

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Šabalja

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. **Vedran Slapničar**

Student:

Tomislav Šabalja

Zagreb, 2014.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Šabalja**

Mat. br.:0035176785

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA PODMORNICE TYPHOON KLASJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF TYPHOON CLASS SUBMARINE**

Opis zadatka:

Za podmornicu klase Typhoon okvirnih dimenzija $L=175$ m, $B=23,3$ m i ukupne visine 25 m koja u potpuno uronjenom stanju ima okvirnu istisninu u iznosu od 48.000 tona potrebno je :

1. Provjeriti izvedivost konstrukcije od titana i HY-80, proračunati čvrstoću te optimirani čvrsti trup. Potrebno je napraviti usporedbu i optimizaciju dimenzija uz variranje razmaka rebara te promjera čvrstih trupova u iznosu od 7,2 m i 8,1 m. Ovdje je postavljen uvjet da na dijelu pramcu zbog smještaja raketnih silosa visina rebra (visina struka + debljina prirubnice) ne smije prelaziti 45 cm.
2. Definirati opremu i smještajne kapacitete uz uvjet da podmornica može biti 120 dana zaronjena. Pogon (nuklearni), naoružanje (torpeda + nuklearne balističke rakete), oprema za život posade te sredstva detekcije (sonar, periskopi).
3. Analizirati stabilitet u oštećenom stanju. Proučiti pravila primjenjiva za stabilitet u oštećenom stanju kao i kriterije operativnosti. U prikladnom programskom sklopu izraditi model za proračun stabiliteta oštećene podmornice. Provjeriti da li se balastiranjem može nakon lakšeg oštećenja brod ispraviti i omogućiti daljnja operativnost prema utvrđenim kriterijima. Odrediti one kombinacije oštećenja koje dovode do nemogućnosti izrona podmornice.

Zadatak zadan:

8. svibnja 2014.


Rok predaje rada:

10. srpnja 2014.

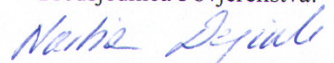
Predviđeni datumi obrane:

16., 17. i 18. srpnja 2014.

Zadatak zadao:


Doc. dr .sc. Vedran Slapničar

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

IZJAVA

Ovom izjavom potvrđujem da sam diplomski zadatak naslova „Analiza podmornice Typhoon klase“ radio potpuno samostalno uz nadzor Doc. Dr. Sc. Vedrana Slapničara, koristeći se isključivo stečenim znanjem usvojenim tijekom dosadašnjeg školovanja i navedenom literaturom.

Tomislav Šabalja

ZAHVALA

Osobni uspjeh zavisi o sposobnosti i upornosti svake osobe, no on također zavisi i o pomoći ljudi koji su dio života te osobe, tako je i u mojem slučaju. Stoga se želim zahvaliti slijedećim osobama.

Zahvaljujem se Doc. Dr. Sc. Vedranu Slapničaru na svoj ustupljenoj pomoći, strpljivosti, susretljivosti i savjetima koje mi je ustupio kao mentor prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se Ivanu Muniću, dipl. ing. na svoj danoj pomoći i savjetima prilikom izrade rada. Zahvaljujem se i Dr. sc. Ivanu Čatipoviću, dipl. ing. na danim smjernicama i danoj podršci.

Također, najviše želim zahvaliti svojoj obitelji, ponajprije ocu Filipu, bratu Filipu i sestri Kristini, na ukazanoj moralnoj i financijskoj pomoći te potpori tokom mojeg studija.

Zahvaljujem i svojoj kumi Andrei i njenom suprugu Goranu na svoj pomoći tokom mog boravka u Zagrebu tijekom studija.

Zahvaljujem i onim kolegama bez čije pomoći i dobre volje za pomaganjem možda ne bih došao do kraja ovog dugačkog i zahtjevnog puta.

Želim se zahvaliti i svim prijateljima koji su mi ukazali podršku tokom mojeg studija.

Na kraju, želim se zahvaliti i svojoj zaručnici Martini na svoj ukazanoj podršci, bodrenju, toleranciji i potpori tokom ovog studija i naročito tokom pisanja ovog diplomskog rada.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	X
POPIS OZNAKA	XII
SAŽETAK.....	XVI
1. UVOD.....	1
2. POVIJESNI RAZVOJ I NASTANAK PODMORNICA KATAMARANSKOG TIPa	2
2.1. Sen Toku klasa	2
2.2. Typhoon klasa podmornica	5
3. OPIS TYPHOON KLASA.....	8
4. ČVRSTOĆA, OPTIMIZACIJA I USPOREDBA ČVRSTIH TRUPOVA IZVEDENIH OD TITANA I HY-80	11
4.1. Projektiranje konstrukcije podmornica klase Typhoon	15
4.2. Opis geometrijskih značajki rebra.....	16
4.3. Funkcija cilja.....	16
4.4. Proračun i funkcije ograničenja	17
4.4.1. Funkcija ograničenja meridijalnog naprezanja	17
4.4.2. Funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja	19
4.4.3. Funkcije ograničenja naprezanja u orebrenju	22
4.4.4. Funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja.....	25
4.4.5. Težinska funkcija ograničenja	25
4.4.6. Grafički prikaz projektnih prostora.....	25
4.4.7. Prikaz svih rezultata	27
4.5. Dimenzije rebra za optimalno rješenje.....	29
4.6. Stabilnost trupa	30
4.6.1. Izvijanje oplata između rebara	31
4.6.2. Izvijanje orebrene oplata između pregrada	32

4.7. Zaključak analize čvrstoće čvrstog trupa	34
5. NAORUŽANJE I OPREMA	35
5.1. Oprema za posadu	35
5.1.1. Smještaj i život posade.....	35
5.1.2. Preduvjeti za život posade.....	37
5.1.3. Rješavanje otpada	37
5.2. Oprema za rad podmornice	38
5.2.1. Nuklearni reaktor	38
5.2.2. Parno-turbinsko postrojenje i pogon	40
5.2.3. Dizel motori i baterije	41
5.3. Naoružanje i ostala vojna oprema	42
5.3.1. Balističke rakete	42
5.3.2. Torpeda	43
5.3.3. Sredstva detekcije, navigacije i komunikacije	45
5.3.4. Sredstva skrivanja	46
6. STABILITET U OŠTEĆENOM STANJU	49
6.1. Općenito o stabilitetu podmornice	49
6.2. Fizikalni problemi stabiliteta podmornice	50
6.2.1. Uzgon	50
6.2.2. Usporedba stabiliteta površinskih i podvodnih brodova.....	52
6.2.3. Trim i balastiranje podmornice	56
6.2.4. Usporedba prodrle vode i izgubljene istisnine	58
6.3. Definiranje forme, čvrstih trupova i balastnih tankova Typhoon klase podmornica. 62	
6.3.1. Definiranje forme lakog trupa.....	62
6.3.2. Definiranje čvrstih trupova unutar lakog trupa	64

6.3.3.	Balastni i ostali tankovi.....	65
6.3.4.	Prikaz i popis prostora i tankova Typhoona.....	72
6.4.	Centracija Typhoon klase podmornica ispod morske površine	80
6.4.1.	Centracija masa Typhoona.....	80
6.4.2.	Centracija mase istisnine Tyhpoona	88
6.5.	Centracija Typhoon klase podmornica na morskoj površini	90
6.6.	Stabilitet Typhoona u oštećenom stanju na površini i ispod nje.....	91
6.6.1.	Analiza oštećenja 1	94
6.6.2.	Analiza oštećenja 2	97
6.6.3.	Analiza oštećenja 3	100
6.6.4.	Analiza oštećenja 4	103
6.6.1.	Analiza oštećenja 5	106
6.6.1.	Analiza oštećenja 6	109
6.6.2.	Usporedba analiza svih 6 oštećenja i njezin zaključak	112
7.	ZAKLJUČAK.....	117
	LITERATURA.....	119
	PRILOG	122

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz rasklopljenog i sklopljenog „Seirana“ [3]	3
Slika 2.	Poprečni presjek Sen Toku klase – pogled s krme [4]	4
Slika 3.	Sen Toku klasa [5].....	4
Slika 4.	Usporedba duljine R-39 raketa s ostalim modelima raketa [8]	6
Slika 5.	Prikaz Typhoon klase podmornice [9]	7
Slika 6.	Podmornica Typhoon klase u plovidbi [10]	7
Slika 7.	3-D prikaz Typhoona s pramca	8
Slika 8.	3-D prikaz s krme	8
Slika 9.	3-D prikaz krme.....	9
Slika 10.	Podmornica Typhoon klase lansira balističku raketu nakon izrona kroz led [12] ..	9
Slika 11.	Prikaz položaja čvrstih trupova i silosa unutra lakog trupa.....	10
Slika 12.	Shematski prikaz poprečnog presjeka na 84 m trupa Typhoon podmornice	11
Slika 13.	Tlocrtni prikaz rasporeda čvrstih trupova [13].....	12
Slika 14.	Arhivski snimak tijekom gradnje podmornice [15]	13
Slika 15.	Izvađeni dio trupa s nuklearnim reaktorom [16]	13
Slika 16.	Tlocrtni prikaz čvrstih trupova s njihovim rebrima.....	14
Slika 17.	3-D prikaz čvrstih trupova i raketnih silosa s rebrima	14
Slika 18.	Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja meridijalnog naprezanja o debljini oplata	19
Slika 19.	Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja za plastično izvijanje o debljini oplata	21
Slika 20.	Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja za plastično-elastično izvijanje o debljini oplata	21

Slika 21.	Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti o debljini oplata.....	24
Slika 22.	Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za opće nestabilnosti o debljini oplata.....	24
Slika 23.	Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja o debljini oplata	25
Slika 24.	Projektni prostor za razmak rebara 0.6 m izrađenog od titana promjera 7.2 m	26
Slika 25.	Uvećani prikaz projektnog područja	26
Slika 26.	Grafički prikaz odnosi težinske funkcije f_G i debljina oplata rebra h za optimalna rješenja cilindra promjera 7.2m izrađenog od HY-80 i titana.....	28
Slika 27.	Grafički prikaz odnosa težinske funkcije f_G i debljine oplata rebra h za optimalna rješenja cilindra promjera 8.1m izrađenog od HY-80 i titana.....	29
Slika 28.	Geometrijska svojstva rebra	29
Slika 29.	Odnos kritičnog naprezanja i broja polu-valova n za promjer cilindra od 7.2 m..	31
Slika 30.	Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova n za promjer cilindra od 8.1m	32
Slika 31.	Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova m za promjer cilindra od 7.2m ...	33
Slika 32.	Bazen	35
Slika 33.	Sauna[26].....	35
Slika 34.	Teretana	36
Slika 35.	Soba za razonodu.....	36
Slika 36.	Shema nuklearnog reaktora [30]	38
Slika 37.	Shema proizvodnje potrebnih oblika energije pomoću nuklearnog reaktora [31]	39
Slika 38.	Prikaz smještaja baterija unutar trupa podmornice [34].....	41
Slika 39.	Shematski prikaz ispaljenja M.I.R.V.-a [36].....	42
Slika 40.	Sustav za automatsko punjenje torpeda ugrađen na Typhoon klasi [37]	43
Slika 41.	Sloj hidroakustičke gume lakog trupa na otvorenoj palubi [40]	47

Slika 42.	Vijci Typhoon klase [41].....	47
Slika 43.	Vrste izvedbi čvrstih trupova [42].....	48
Slika 44.	Pokus s uzgonom [46]	51
Slika 45.	Vrste uzgona [43]	52
Slika 46.	Brod na površini vode	53
Slika 47.	Stabilitet broda na površini.....	54
Slika 48.	Stabilitet podmornice	55
Slika 49.	Trim podmornice uslijed male promjene uzdužne udaljenosti centra istisnine i centra mase sistema	56
Slika 50.	Princip balastiranja podmornice [44]	57
Slika 51.	Izranjanje podmornice pri maksimalnoj brzini i trimu [45]	58
Slika 52.	Prikaz „pontona podmornice“	59
Slika 53.	Ponton podmornica pod trimom od 15°	61
Slika 54.	Pronađena teoretska rebra [47].....	63
Slika 55.	Teoretska rebra izrađenog modela	63
Slika 56.	Prikaz pojednostavljenog modela.....	64
Slika 57.	Prikaz čvrstih trupova, njihova podjela i duljine.....	65
Slika 58.	Prikaz smještaja MBT i FF tankova	66
Slika 59.	Raspored HT-ova unutar lako trupa i između glavnih trupova	67
Slika 60.	Prikaz podijele NT-a	70
Slika 61.	Prikaz smještaja ST, TG, NT i KT unutar lakog trupa.....	70
Slika 62.	Smještaj PB-a na Typhoonu	71
Slika 63.	3-D prikaz prostora od 134. m do 175. m Typhoon podmornice	76
Slika 64.	3-D prikaz prostora od 100. m do 134. m Typhoon podmornice	77
Slika 65.	3-D prikaz prostora od 63. m do 100. m Typhoon podmornice	78

Slika 66.	3-D prikaz prostora od 0. m do 63. m Typhoon podmornice	79
Slika 67.	Težišta odsjeka Typhoona	83
Slika 68.	Prikaz težišta opreme i naoružanja	86
Slika 69.	Prikaz težišta nepoznatih masa i PB-a	88
Slika 70.	Prostori koji sudjeluju u uzgonu	89
Slika 71.	Rezultati proračuna stabiliteta neoštećene Typhoon podmornice na morskoj površini	91
Slika 72.	Prikaz računanja trima i nagiba	93
Slika 73.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 1... 95	
Slika 74.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 1	96
Slika 75.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 2... 98	
Slika 76.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 2	99
Slika 77.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 3. 101	
Slika 78.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 3	102
Slika 79.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 4. 104	
Slika 80.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 4	105
Slika 81.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 5. 107	
Slika 82.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 5	108
Slika 83.	Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 6. 110	
Slika 84.	Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 6.....	111
Slika 85.	Usporedba volumena podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima	113
Slika 86.	Usporedba odnosa LCB-a i LCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima	113
Slika 87.	Usporedba odnosa VCB-a i VCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima	114

Slika 88.	Usporedba odnosa TCB-a i TCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima.....	114
Slika 89.	Usporedba trimova podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima...	115
Slika 90.	Usporedba nagiba podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima	115
Slika 91.	KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 1 na površini.	123
Slika 92.	Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 1 na površini.....	124
Slika 93.	Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 1	124
Slika 94.	KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 2 na površini.	125
Slika 95.	Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 2 na površini.....	126
Slika 96.	Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 2 na površini.	126
Slika 97.	Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 3 na površini.....	127
Slika 98.	Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 3 na površini.	127
Slika 99.	KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 4 na površini.	128
Slika 100.	Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 4 na površini.....	129
Slika 101.	Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 4 na površini.	129
Slika 102.	KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 5 na površini.	130

Slika 103. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 5 na površini.....	131
Slika 104. .Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 5 na površini.	131
Slika 105. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 6 na površini.	132
Slika 106. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 6 na površini.....	133
Slika 107. Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 6 na površini.	133

POPIS TABLICA

Tablica 1. Opće karakteristike Typhoon klase podmornica	10
Tablica 2. Fizička i mehanička svojstva te sastav HY-100 čelika i titanijske legure [21]	15
Tablica 3. Rezultati optimizacije čvrstih trupova za HY-80	27
Tablica 4. Rezultati optimizacije čvrstih trupova za titan	27
Tablica 5. Vrste i masene količine otpada posade po danu [29]	38
Tablica 6. Opis dodijeljenih oznaka i njihovih prefiksa prostorima Typhoona, njihov opis i naplavljenost	73
Tablica 7. GHS oznake svih prostora na Typhoonu, njihovi volumeni i mase istisnine.....	74
Tablica 8. Podaci cilindara potrebni za dobivanje mase njihovog rebra.....	81
Tablica 9. Podaci potrebni za dobivanje masa svih odsjeka Typhoona	83
Tablica 10. Težišta konstrukcije čvrstih trupova.....	84
Tablica 11. Mase i težišta opreme i naoružanja	87
Tablica 12. Prikaz svih masa i njihov težišta te izračun sveukupnog težišta mase Typhoona.	88
Tablica 13. Konačan izračun težišta mase istisnine Typhoon podmornice.....	89
Tablica 14. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 1	94
Tablica 15. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 1 1/2	95
Tablica 16. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 1 2/2	96
Tablica 17. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 2.....	97
Tablica 18. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 2 ..	98
Tablica 19. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 3.....	100
Tablica 20. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 3	101
Tablica 21. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 4.....	103

Tablica 22. Prikaz proračuna stabilnosti i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 4	104
Tablica 23. Prikaz proračuna stabilnosti i rezultata za stanje oštećenja 5.....	106
Tablica 24. Prikaz proračuna stabilnosti i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 5	107
Tablica 25. Prikaz proračuna stabilnosti i rezultata za stanje oštećenja 6.....	109
Tablica 26. Prikaz proračuna stabilnosti i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 6	110
Tablica 27. Usporedba rezultata svih analiziranih oštećenja	112

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
H_l	m	dubina ograničenja zarona podmornice
H_d	m	projektna dubina zarona podmornice
ΔH	m	sigurnost od propadanja podmornice
K_s	/	faktor sigurnosti
ρ	t/m ³	gustoća mora
g	m/s ²	ubrzanje gravitacije
r_c	m	polumjer promatranog cilindra
p_d	Pa	projektni tlak
ρ_t	t/m ³	gustoća titana
σ_t	Pa	granica razvlačenja titana
E_t	Pa	modul elastičnosti titana
ν_t	/	poissonov koeficijent titana
a	m	širina pojasa rebra
h_f	m	širina pojasa rebra
b	m	visina struka rebra
h_s	m	debljina struka rebra
h	m	debljina oplata
l	m	razmak između rebara
A	m ²	površina poprečnog presjeka rebra
f_G	/	težinski faktor/funkcija cilja
G	t	težina cilindra širine jednog razmaka rebra
U	t	uzgon koji djeluje na cilindar širine razmaka jednog rebra
A_1	/	funkcija ograničenja meridijalnog naprezanja
A_{21}	/	funkcija ograničenja cirkularnog naprezanja za plastično izvijanje
A_{22}	/	funkcija ograničenja cirkularnog naprezanja za elasto-plastično izvijanje
A_{31}	/	funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti
A_{32}	/	funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za opću nestabilnost
A_4	/	funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja
A_G	/	težinska funkcija
λ_1	/	lambda funkcija meridijalnog naprezanja
λ_{21}	/	lambda funkcija cirkularnog naprezanja za plastično izvijanje

λ_{22}	/	lambda funkcija cirkularnog naprezanja za elasto-plastično izvijanje
λ_{31}	/	lambda funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju
λ_{32}	/	lambda funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju
F_1	/	F funkcija geometrijskih karakteristika
F_2	/	F funkcija geometrijskih karakteristika
F_3	/	F funkcija geometrijskih karakteristika
F_4	/	F funkcija geometrijskih karakteristika
N_1	/	N funkcija
N_{21}	/	
N_{22}	/	
N_{31}	/	
k	/	omjer odnosa širine prirubnice a i razmaka rebra l
L_{ef}	m	unosiva širina
I_r	m ⁴	moment tromosti presjeka rebra
p_{cl}	Pa	kritično naprezanje oplata između rebara
n	/	broj poluvalova u radijalnom smjeru
π	/	Ludolfov broj
p_{cL}	Pa	kritično naprezanje oplata između pregrada
m	/	broj poluvalova u aksijalnom smjeru
L	m	udaljenost između nepropusnih pregrada
m_{CO}	t	cijelokupna masa reaktorskog cilindra Ohio klase podmornica
P_0	MW	snaga reaktora Ohio klase podmornica
V_{CO}	m ³	volumen reaktorskog cilindra Ohio klase podmornica
P_T	MW	snaga reaktora Typhoon klase podmornica
V_{CT}	m ³	volumen reaktorskog cilindra Typhoon klase podmornica
m_{CT}	t	cijelokupna masa reaktorskog cilindra Typhoon klase podmornica
m_{KT}	t	masa konstrukcije reaktorskog cilindra Typhoon klase podmornica
m_{KO}	t	masa konstrukcije reaktorskog cilindra Ohio klase podmornica
ρ_{HY-80}	t/m ³	gustoća HY-80 čelika
m_{RO}	t	masa reaktora Ohio klase podmornica
m_{RT}	t	masa reaktora Typhoon klase podmornica
D	t	masa tijela uronjenog u fluid
U	t	uzgon koji djeluje na uronjeno tijelo
∇	m ³	iznos volumena uronjenog dijela tijela
G	/	težište mase tijela

B	/	težište uronjenog dijela volumena tijela
\overline{MB}	m	metacentarski radijus
I	m ⁴	moment tromosti vodne linije
L_{VL}	m	duljina vodne linije
B_{VL}	m	širina vodne linije
F	N	sila
M	/	metacenar
\overline{GZ}	m	poluga statičkog stabiliteta
M_{st}	tm	moment poluge statičkog stabiliteta
\overline{GB}	m	udaljenost težišta mase i težišta volumena tijela
φ	°	kut nagiba
VCB	m	vertikalni položaj težišta uzgona
VCG	m	vertikalni položaj težišta mase
ψ	°	trim
LCB	m	uzdužni položaj težišta uzgona
LCG	m	uzdužni položaj težišta mase
d	m	razmak teoretskih rebara
MBT	/	glavni balastni tank
FF	/	slobodno naplavljivi tank
HT	/	tvrdi tank
VBT	/	varijabilni balastni tank
KT	/	kompensacijski tank
ST	/	sigurnosni tank
NT	/	negativni tank
PB	/	čvrsti balast
m_R	t	masa jednog rebra
B_C	/	broj cilindara istog odsjeka
L_C	m	duljina cilindara
L_O	m	sveukupna duljina cilindara istog odsjeka
B_R	/	broj rebara
B_{NP}	/	broj nepropusnih pregrada
m_{NP}	t	masa nepropusne pregrade
m_O	/	masa odsjeka
TCB	m	poprečno težište uzgona koji djeluje na tijelo
TCG	m	poprečno težište mase tijela
X_O	m	uzdužni položaj težišta mase svih odsjeka
Z_O	m	vertikalni položaj težišta mase svih odsjeka
m_{OLT}	t	masa oplata lakog trupa

m_{RLT}	t	masa rebara lakog trupa
X_{LT}	m	uzdužni položaj težišta mase lakog trupa
Z_{LT}	m	vertikalni položaj težišta mase lakog trupa
X_{ON}	m	uzdužni položaj težišta mase lakog trupa
Z_{ON}	m	vertikalni položaj težišta mase lakog trupa
X_{SO}	m	uzdužni položaj ostale strukture i opreme
Z_{SO}	m	vertikalni položaj ostale strukture i opreme

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada, „Analiza podmornice Typhoon klase“, je objasniti opći princip rada i projektiranja podmornica, a da se istovremeno stekne detaljniji i jasniji uvid u Typhoon klasu podmornica. Rad je podijeljen na šest poglavlja.

U prvom poglavlju se općenito opisao nastanak podmornica te njihov povijesni razvoj sve do danas. Objašnjen je i utjecaj podmornica na promjene u pomorskom ratovanju.

U drugom poglavlju se kroz povijesne činjenice pokušava dočarati kako su nastale i koje su izvedbe podmornica prethodile nastanku Typhoon klase i kako je nastala sama Typhoon klasa podmornica.

U trećem poglavlju opisane su opće karakteristike Typhoon klase podmornica.

U četvrtom poglavlju se kroz proračun čvrstoće čvrstih trupova utvrdilo da li je moguće izvesti trupove prema konstrukcijskim dimenzijama pronađenim u literaturi, a da se istovremeno zadovolje kriteriji čvrstoće za opterećenja koja djeluju na podmornicu prilikom njezine plovidbe na operacijskoj dubini.

Peto poglavlje se bavi opremom i naoružanjem Typhoon klase podmornica.

Šesto poglavlje se bavi problemom stabiliteta. Općenito je objašnjen problem stabiliteta podmornica, a zatim je na temelju toga objašnjen stabilitet Typhoon klase podmornica. Također analiziran je stabilitet Typhoon klase podmornice za 6 predviđenih mogućih oštećenja za podvodno i površinsko stanje plovidbe. Od 6 analiziranih oštećenja pokazalo se je da je oštećenje krme najkritičnije.

Na kraju diplomskog rada dan je zaključak.

Ključne riječi: podmornica, Typhoon klasa podmornica, nuklearno pogonjena podmornica, čvrstoća podmornice, oprema podmornice, stabilitet podmornice, stabilitet podmornice u oštećenom stanju

SUMMARY

The goal of this master thesis, "Analysis of Typhoon-class submarines", is to explain basic principle of operation and design of submarines and, at the same time, to give a more detailed and clearer insight into the Typhoon class submarine. The paper is divided into six chapters.

The first chapter briefly describes the occurrence of submarines and their development through history until today. It also describes how occurrence of a submarines impacted on changes in maritime warfare.

The second chapter, through the historical facts, attempts to describe how submarines were created and which submarines preceded the Typhoon class submarine occurrence. It also explains how was created the Typhoon submarine class.

The third chapter describes the general characteristics of the Typhoon class submarine.

In the fourth chapter, by strength calculations of solid hulls, is determined whether it is possible to build hulls with structural dimensions stated in the literature while at the same time satisfying the strength criteria for loads acting on a submarine during its navigation in the operating depth.

The fifth chapter deals with weapons and outfit of a Typhoon class submarines.

The sixth chapter deals with the stability issues. The stability explanation of a Typhoon class submarines is based on the general explanation of submarine stability which is also included in chapter. It also analyzes the stability of Typhoon class submarines for six possible damage scenarios for the underwater and surface sailing conditions. Regarding 6 analyzed damage conditions analysis shown that the damage of the after peak is most critical.

At the end of the master thesis a conclusion is given.

Key words: submarine, Typhoon class submarine, nuclear submarine, submarine strenght, weapons and submarine outfit, submarine stability, damaged submarine stability

1. UVOD

Moderne podmornice, svojom pojavom prije više od 100 godina, nepovratno su izmijenile pomorski način ratovanja. Odmah njihovom pojavom, zbog mnogobrojnih karakteristika poput nesmetanog urona i izrona te mogućnosti da napadaju brodove dok su skrivene ispod morske površine, postale su iznimno poželjne da postanu sastavnim dijelom mornarica svjetskih velesila. No, kako su podmornice moćni „saveznik“ svake velesile tako su i njihov najveći neprijatelj kada su u sastavu neprijateljske mornarice. U Drugom svjetskom ratu, njemačke „U-boat“ podmornice potopile su oko 2800 savezničkih brodova što čini oko 70% izgubljenih savezničkih brodova u Drugom Svjetskom ratu [1]. Zbog njihove velike prijetnje razvijaju se nove vrste naoružanja i vojnih tehnologija čija je svrha bila detekcija i eliminacija neprijateljskih podmornica. Razvijaju se dubinske bombe, usavršavaju se sonari, radari i ostalo. Također, mijenjaju se i pomorske taktike ratovanja. Danas, širom upotrebom nosača zrakoplova, u detekciji podmornica upotrebljavaju se i zrakoplovi. Razvoj anti-podmorničkog naoružanja rezultirao je usavršavanjem podmornica. S vremenom su postajale veće i tiše, mogle su dublje uroniti a njihova autonomnost se sve više povećavala. Razvojem nuklearne tehnologije te njezinim korištenjem kao pogonom za podmornice, rezultiralo je neograničenom autonomnošću podmornica. Jedini razlog izrona je dobava hrane za posadu, izmjena posade te remont.

Današnje podmornice u kombinaciji s nuklearnim pogonom i naoružanjem kao što su nuklearne balističke rakete su najsmrtonosnije oružje, te najveće sredstvo zastrašivanja u svijetu. Budući da se takve podmornice smatraju najzahtjevnijim i najskupljim ljudskim proizvodom, čak skupljim i zahtjevnijim od svemirskih brodova, za proizvodnju jedne takve podmornice potrebno je osigurati ogromne novčane, industrijske i gospodarske uvjete. No, pored toga također je potrebno osigurati teorijsko-znanstvene i tehnološke uvjete za ostvarenje takvog projekta čemu je ovaj rad i posvećen. Cilj ovog rada je da se analizom podmornice, za čiju je izgradnju korištena vrhunska tehnologija i visoko znanje, dobije novi način razmatranja i novi pogledi u tehnologiji i konstrukciji. Za analizu je odabrana ruska Typhoon klasa podmornica koja je najveća podmornica u svijetu. Odabrana je zato što ima specifičnu konstrukciju tzv. katamaranskog tipa. Konstrukcija katamaranskog tipa je izvedena tako da se unutar lakog trupa podmornice nalaze dva paralelno postavljena čvrsta trupa. Važno je napomenuti da nije pronađena niti jedna literatura koja se bavi detaljnom analizom podmornica Typhoon klase.

2. POVIJESNI RAZVOJ I NASTANAK PODMORNICA KATAMARANSKOG TIPA

Podmornica je brod koji ima mogućnost plovidbe na vodenoj površini te ispod nje, prilikom čega u bilo kojem trenutku samostalno može izroniti i uroniti. Pojam podmornica se najčešće odnosi na velika, autonomna podvodna plovila s posadom, no može se koristiti i za manja, robotizirana podvodna plovila.

Danas se podmornice prvenstveno koriste u vojne svrhe, no također se često koriste u znanstveno-istraživačke i inženjerske svrhe, te u manjoj mjeri i u turističke svrhe.

Prvo podvodno plovilo sagradio je nizozemski izumitelj Cornelis Van Drebbel. Podmornica je bila izrađena od drva i kože dok joj se pogon sastojao od 12 veslača pomoću kojih je mogla prevesti nekoliko putnika ispod rijeke Temze. S vremenom razni izumitelji poboljšavaju podmornice te se krajem 18. stoljeća u američkoj revoluciji pojavljuje „Bušnelova kornjača“ koja postaje prvom podmornicom korištenom u ratne svrhe. Početkom 1860.-ih izbija američki građanski rat u kojem su se također koristile podmornice u vojnim sukobima. Njihov značaj, posebno u vojnim svrhama, ubrzano raste. 1878. godine John P. Holland je sagradio svoju prvu podmornicu Holland No. 1 koja je postala temelj modernih podmornica, zbog čega se Holland smatra izumiteljem modernih podmornica.

Ideja podvodnog broda, kojeg je skoro nemoguće otkriti, zainteresirala je mnoge svjetske velesile čime započinje njihova široka vojna primjena i razvoj. U Prvom svjetskom ratu dolazi do mnogih izuma čime se karakteristike podmornica znatno poboljšavaju.

2.1. Sen Toku klasa

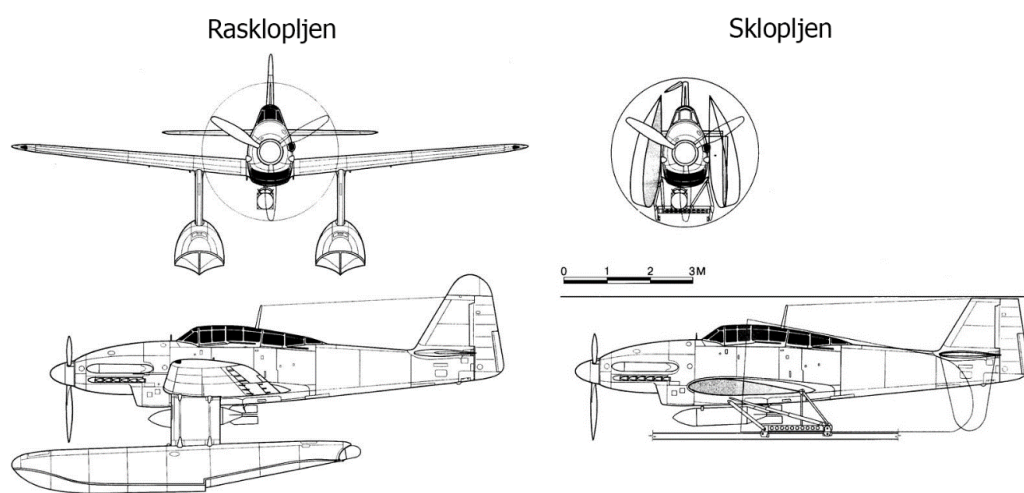
U Drugom svjetskom ratu primjena podmornica postaje sve veća. Krajem 1941. godine Japan ulazi u Drugi svjetski rat napadom na Pearl Harbor. Tadašnji admiral japanske mornarice Isoroku Yamamoto previdio je da će rat sa Amerikancima biti težak. Ključnim u dobivanju rata smatrao je da bitku premjesti na Američko tlo i time uništi protivnički moral. Po uzoru na Njemačku, veliku prednost je vidio u podmornicama, no one tada nisu mogle vršiti napade na kopno. Idealnim oružjem za napade na kopno prepoznao je u nosačima zrakoplova no oni su bili preveliki i prespori i nikad se ne bi neopaženo približili obalama SAD-a a da ih ne primjeti i ne napadne mornarica SAD-a. Odlučio je da mu treba oružje koje će iskoristiti prednosti podmornice (nesmetana i skrivena plovidba) i nosača zrakoplova (mogućnost napada bilo gdje

na kopnu) [2]. Rezultat je bila podmornica nosač zrakoplova. Razradu i projektiranje svoje zamisli prepustio je japanskim inženjerima te je cijeli projekt nazvao I-400 i označio ga tajnim.

Ideja podmornice nosača zrakoplova postojala je još u vrijeme Prvog svjetskog rata. Nijemci su pokušali napraviti zrakoplov koji bi se postavio na palubu podmornice. Podmornica bi poluuronjena doplovila do određene lokacije s koje bi otpustila zrakoplov te bi on poletio s morske površine i obavio zadanu misiju. Zbog tehničkih komplikacija projekt je odbačen.

U Drugom svjetskom ratu mnoge zemlje su imale podmornicu koja je nosila zrakoplov, no to su bili manji zrakoplovi, maksimalno je bio samo jedan i on bio predodređen za misije izviđanja.

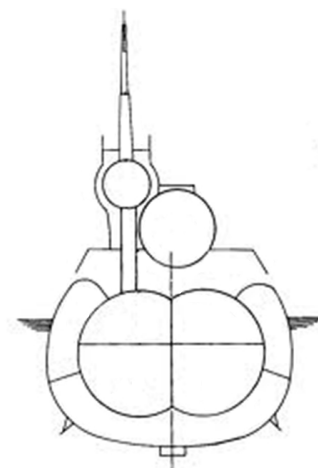
To Yamamotu nije bilo dovoljno. On je trebao više većih zrakoplova smještenih na podmornici koja bi mogla zaroniti do 100 metara dubine. Također, podmornice su trebale imati mogućnost brzog lansiranja zrakoplova kako ne bi provodile puno vremena na morskoj površini stoga su morale biti opremljene parnim katapultom za lansiranje zrakoplova. Zrakoplovi bi zbog brzog polijetanja trebali unaprijed zagrijati motore što traje i do 20 minuta. To mogu napraviti u hangaru dok je podmornica pod vodom no, zbog smrtonosnih plinova to nije moguće. Rješenje za to je bilo ulijevanje ugrijanog ulja u motore zrakoplova. Zbog tehničke izvedbe promjer hangara je bio samo nešto veći od 3 metra što znači da su zrakoplovi morali biti sklopivi. Rezultat zadanih zahtjeva je bio zrakoplov Aichi M6A1 Seiran (Slika 1).



Slika 1. Prikaz rasklopljenog i sklopljenog „Seirana“ [3]

Konstrukcija same podmornice je također bila izazov. Zbog lansirne rampe za polijetanje zrakoplova podmornica je morala biti dulja od najduljih podmornica tog vremena. I-400 Sen Toku je morao biti dug čak preko 120 metara što ju je učinilo najduljom podmornicom tog

vremena. Također, tadašnje podmornice su građene od jednog čvrstog trupa što je zadovoljavalo sve tadašnje projektne zahtjeve. No, smještajem teškog hangara s teškim naoružanjem (bombe) i zrakoplovima na njega učinilo bi ju iznimno nestabilnom. Taj problem je riješen dodavanjem drugog čvrstog trupa paralelno uz postojeći tako da se je hangar smjestio na sredini iznad dva paralelna čvrsta trupa. Takva konstrukcija je snizila težište podmornice i povećala širinu vodne linije podmornice na površini čime je riješen problem stabiliteta (Slika 2).



Slika 2. Poprečni presjek Sen Toku klase – pogled s krme [4]

Sa riješenim svim tehničkim problemima Sen Toku klasa podmornica je imala masu istisnine od 6700 tona, mogla je nositi tri „Seirana“, imala je autonomiju oko 70 000 km, posadu od oko 145 ljudi, bila je opremljena s 4 dizel i 2 elektromotora, naoružanje joj se sastojalo od 8 torpednih cijevi, jednog topa i 3 strojnice (Slika 3). Njihova izgradnja započinje početkom 1943. godine.



Slika 3. Sen Toku klasa [5]

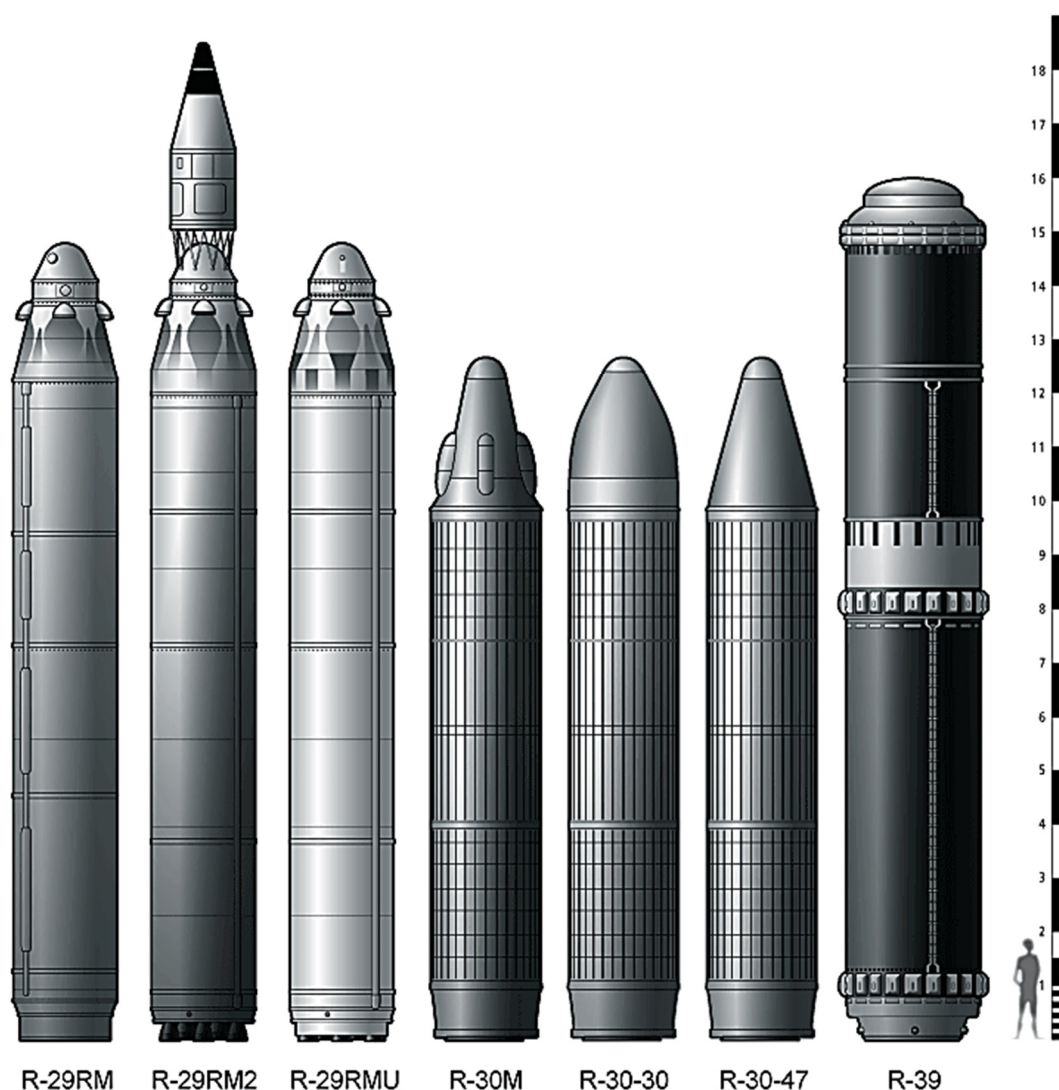
Ukupno je bilo predviđeno 18 takvih podmornica no zbog njihove komplicirane izvedbe, izgradnja prve podmornice I-400 trajala je skoro do samog kraja rata tako da one nisu nikad upotrijebljene u vojnim svrhama. Izgrađene su 3 podmornice u klasi dok su ostale otkazane. Sen Toku klasa je tehnološki značajna zbog dizajna velikog vodonepropusnog hangara što je s

vremenom dovelo do izrade spremnika za lansiranje balističkih projektila u američkim podmornicama, no također je poslužila i kao osnova projektiranja Sovjetske Typhoon klase podmornica.

2.2. Typhoon klasa podmornica

Uskoro, nakon završetka Drugog Svjetskog rata, započinje Hladni rat kojeg predvode SAD s jedne strane i SSSR s druge strane. Hladni rat je najviše obilježen utrkom u naoružavanju te tehnološkim i znanstvenim dostignućima. Bacanjem atomske bombe na Hirošimu i Nagasaki SAD su otvorile utrku u nuklearnoj tehnologiji i naoružavanju. Također, na temelju vrlo napredene njemačke raketne tehnologije započinje i utrka u razvijanju raketnog naoružanja koje se je najviše vidjelo u svemirskim pothvatima. U cijelu tu sliku najviše su se uklopile podmornice kao najtiše i najzastrašujuće oružje. Naime, 1954. godine SAD u službu puštaju prvu podmornicu (USS Nautilus) u svijetu s nuklearnim pogonom. To se vrlo uskoro pokazuje kao moćnim oružjem. Nautilus uskoro obara rekord u duljini neprekinutog zarona te dolazi na Sjeverni pol. SSSR ih slijedi te 1959. godine u službu stavlja svoju podmornicu na nuklearni pogon i već 1961. godine vrši uspješne pokuse u lansiranju nuklearno naoružanih balističkih raketama s podmornica i točnog pogađanja cilja na kopnu. Utrka je postajala sve napetija, a SSSR ju je polako gubio. Podmornice su im bile bučne, a rakete su bile relativno malog dometa (2400 km). Naime, da bi uspješno lansirale rakete na SAD morale su izaći iz sigurnog Barentsovog mora, zaobići Norvešku, te proći između Grenlanda i Velike Britanije. Između Grenlanda, Islanda i Velike Britanije se nalazio niz SAD-ovih podvodnih prislušnih postaja (SOSUS) čiji je cilj bio detekcija Sovjetskih podmornica, što je umanjivalo mogućnost napada SSSR-a na SAD podmornicama [6]. Da bi sustigli u vojnoj moći SAD, SSSR u službu stavlja Delta klasu podmornica. Njihova prednost je bila ta što su bile mnogo tiše, a domet njihovih raketa je bio 7700 km, što je značilo da mogu vršiti napade iz sigurnosti Barentsovog mora. Utrka dobiva novi tempo 1972. godine kada je SAD započeo rad na svojoj najvećoj nuklearno pognojenoj klasi podmornica naoružanoj s nuklearnim balističkim raketama – Ohio klasi. SSSR je odlučio odgovoriti podmornicom boljom u svim aspektima. U početku je odmah donesena ključna odluka u dizajnu nove podmornice. Iz sigurnosnih razloga njezine balističke rakete su morale biti pogonjene čvrstim gorivom. To je bilo jako bitno zato jer je SSSR do tada imao iskustva samo s raketama pogonjenim tekućim gorivom. U tom periodu SSSR je započeo istraživanja na čvrstom pogonu raketa, točnije razvijao je R-31 i R-39 rakete. R-31 raketa je

bila projektirana za domet do 3900 km dok je R-39 (NATO oznaka - SS-N-20 Sturgeon) bila projektirana za domet do 8400 km s mogućnošću nošenja 10 nuklearnih glava s ciljem gađanja 10 različitih ciljeva. Projekt R-39 je bio superiorniji od R-31 te je on odabran kao naoružanje nove podmornice. No, zbog skoro nikakvog iskustva u čvrstom raketnom gorivu, dimenzije R-39 rakete su enormne – duljina 16 metara, promjer 2.4 m (napomena: u cijelom radu korištena je decimalna točka) i masa od 87.6 tona [7]. Za usporedbu, SAD-ov Trident I sustav, koji je bio predviđen za ugradnju na tada novu Ohio klasu, imao je masu od 33 tone i domet od 7400 km. Ohio klasa podmornica ima duljinu od 170 metara i istisninu od 19 000 tona.

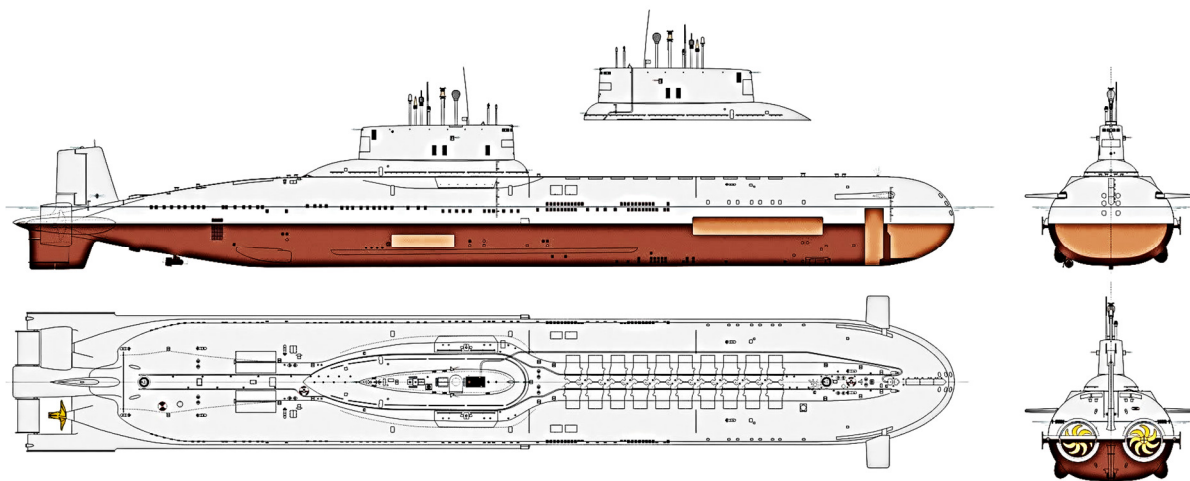


Slika 4. Usporedba duljine R-39 raketa s ostalim modelima raketa [8]

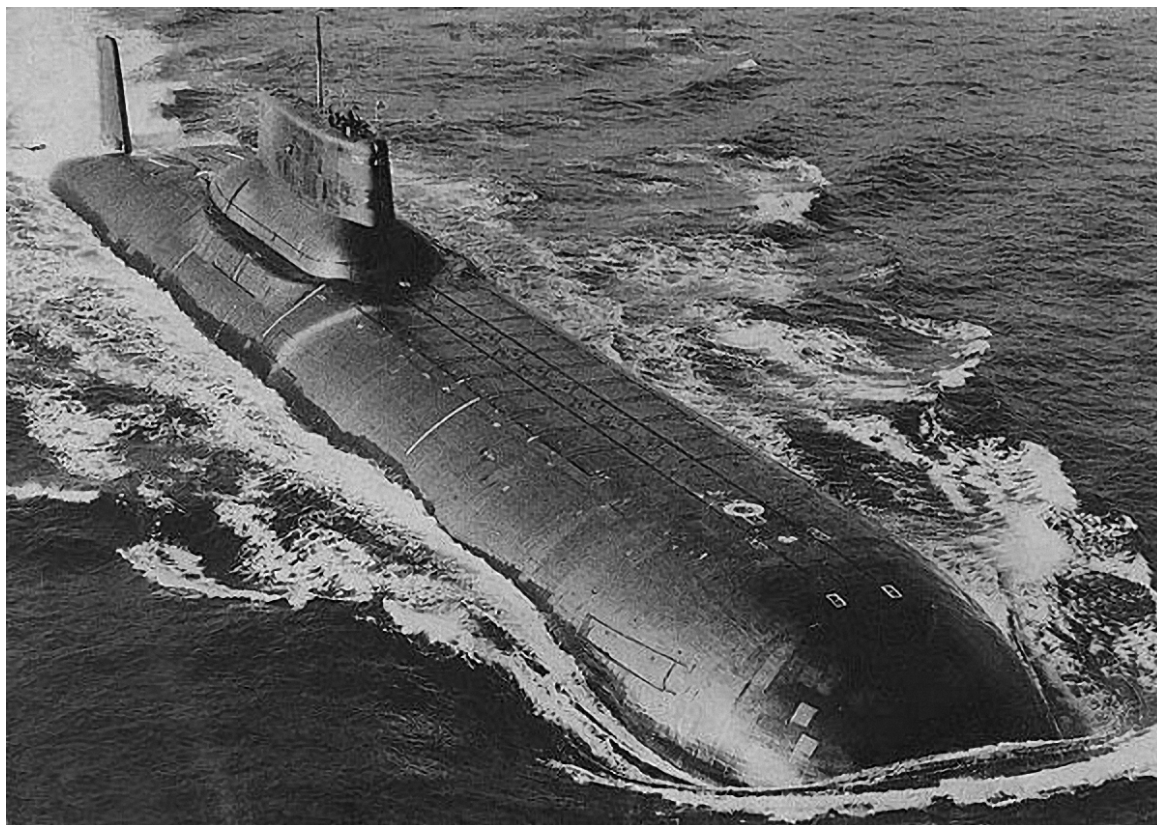
Zbog enormnih dimenzija R-39 rakete, Sovjetski inženjeri su morali razraditi inovativno konstrukcijsko rješenje. Nova podmornica je morala biti dovoljno velika da nosi 24 R-39 rakete, da bude što tiša, da pod vodenom površinom razvija brzinu od oko 27 čvorova, da ima

moćnost izrona ispod leda debelog i do 3 metra, te da omogući autonomnost podmornice i do 120 dana. Razrađeno je preko 200 projekata. Najboljim se pokazao projekt sa smještenim raketnim silosima između dva čvrsta trupa, tj. tzv. „katamaranski tip“. U 12. mjesecu 1973. sovjetska je vlada donijela odluku o izgradnji Typhoon klase podmornice.

Karakteristike konačnog projekta su bile: duljina 175 m, istisnina lakog trupa 50 000 tona, širina 23.3m te je smješteno 20 od prvotno zamišljenih 24 R-39 rakete (Slika 5).



Slika 5. Prikaz Typhoon klase podmornice [9]

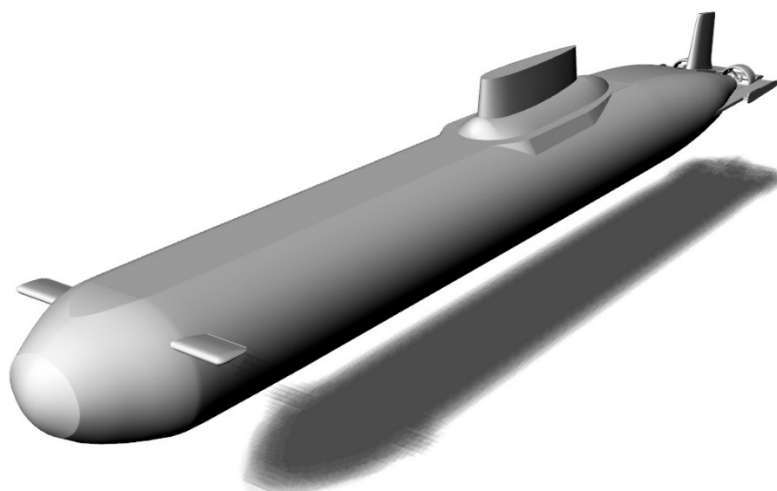


Slika 6. Podmornica Typhoon klase u plovidbi [10]

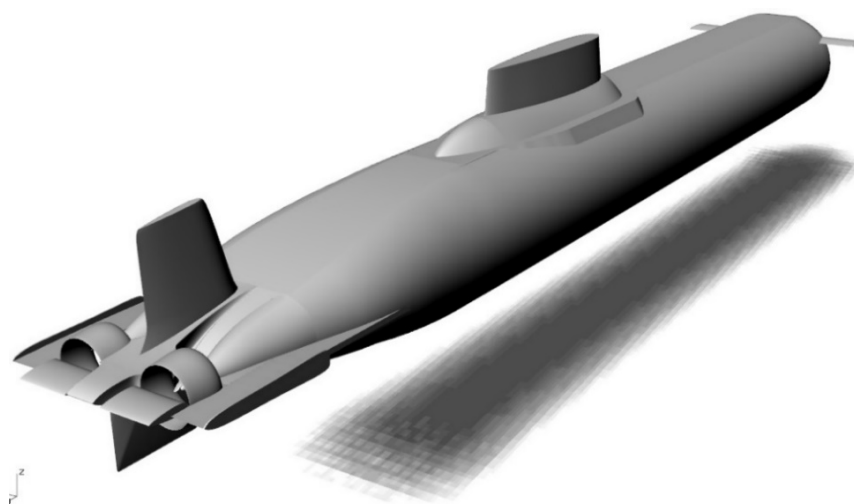
3. OPIS TYPHOON KLASE

Za početak je potrebno napomenuti kako je ime klase „Typhoon“ zapravo ime koje je NATO dodijelio ruskoj klasi podmornica „Akula“, tj. „Projekt 941“ što znači da je originalno Rusko ime Typhoon klase zapravo Akula. Da stvar bude još kompliciranija NATO je ruskoj klasi podmornica „Shchuka“ dodijelio ime „Akula“ zbog čega se te dvije klase često miješaju. U daljnjem tekstu koristi će se NATO oznaka Typhoon.

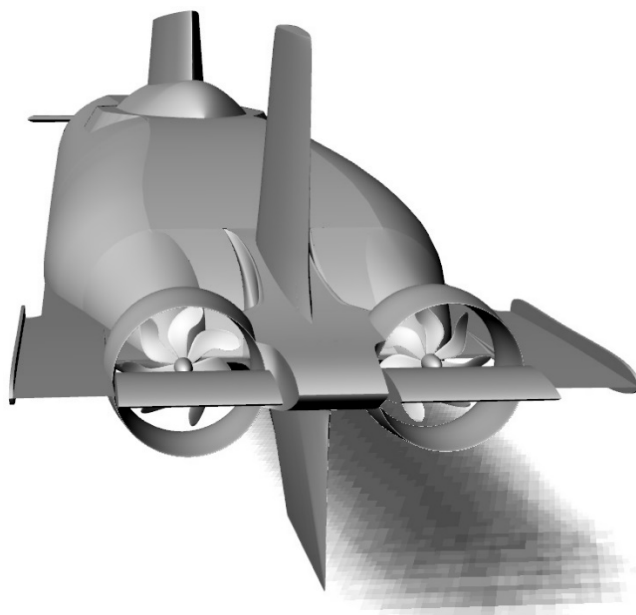
Kobilica za prvu podmornicu Typhoon klase (Slika 7, Slika 8, Slika 9) postavljena je 1976. godine i u službu je prva podmornica stavljena već 1981. godine. U izgradnji je sudjelovalo više od 1000 kooperanata, a za nagradu za rekordnu brzinu izgradnje dodijeljeno je preko 1200 medalja sovjetskog saveza osobama koje su pridonijele projektu, a od toga je samo preko 400 nagrada dodijeljeno radnicima brodogradilišta [11].



Slika 7. 3-D prikaz Typhoona s pramca



Slika 8. 3-D prikaz s krme



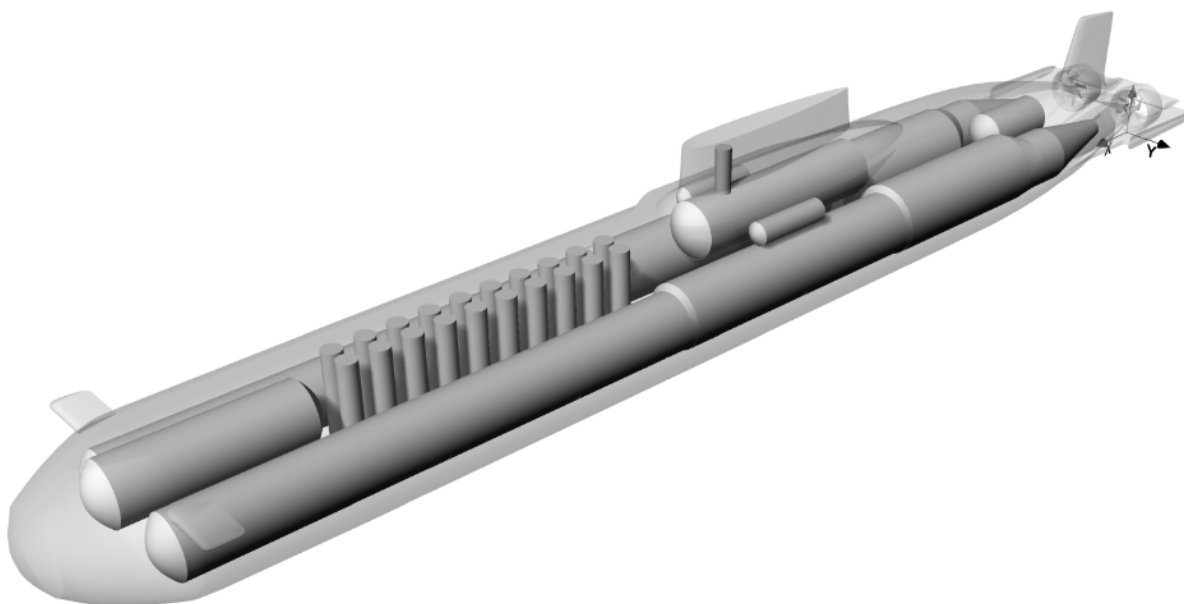
Slika 9. 3-D prikaz krme

Podmornica je izrađena s pojačanim pramcem i nadgrađem te vijcima zaštićenima sapnicama kako bi mogla bez problema probiti led deo i do 3 metara. Također, pramčani hidroplanovi su se mogli uvući. Bilo je zamišljeno da se podmornica kreće ispod leda gdje ju nijedan neprijateljski brod ne može pratiti, a zbog buke od stalnog pucanja leda ne može ju pratiti ni neprijateljska podmornica. U slučaju potrebe, podmornica bi trebala izroniti probijajući led i nesmetano lansirati sve rakete (Slika 10). U slučaju potrebe za ponovnim lansiranjem bio je napravljen specijalizirani brod „Aleksandr Brykin“ opremljen 125 tonskom dizalicom kojom je trebao puniti silose Typhoona novim R-39 raketama.



Slika 10. Podmornica Typhoon klase lansira balističku raketu nakon izrona kroz led [12]

Jedinstvena karakteristika Typhoon klase je što je unutar vanjskog tj. lakog, hidrodinamički oblikovanog trupa, smješteno 5 čvrstih trupova. Dva čvrsta paralelno smještena trupa protežu se cijelom duljinom podmornice (u daljnjem tekstu: glavni trupovi). Na njima je u simetrali, na krmi, sredini i pramcu ukupno smješteno tri manja čvrsta trupa. Na krmenom manjem trupu smješteni su mehanizmi za manevriranje, na srednjem komandni most, a na pramčanom torpedni prostor. Raketni silosi su smješteni između glavnih trupova u pramčanom dijelu (Slika 11).



Slika 11. Prikaz položaja čvrstih trupova i silosa unutra lakog trupa

Podmornica ima dva nuklearna reaktora koji preko dva sedmero-krilna vijka promjera 5.55 metara ostvaruju brzinu od 27 čvorova kada je podmornica u potpunosti zaronjena.

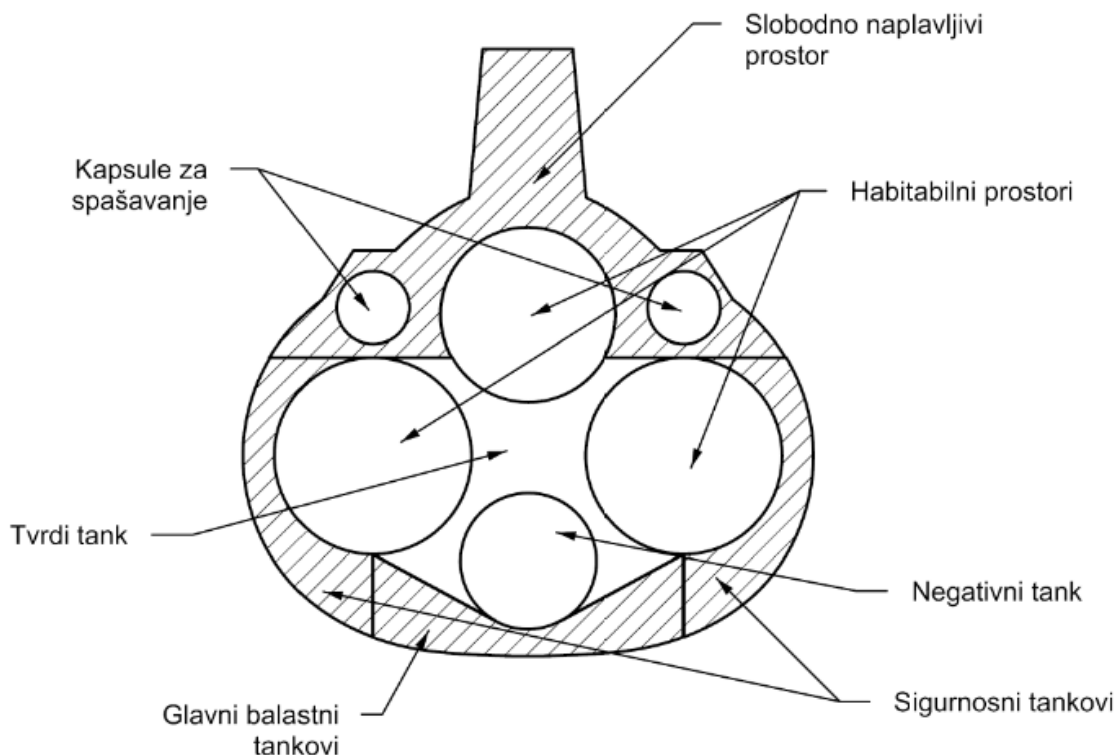
Tablica 1. Opće karakteristike Typhoon klase podmornica

Duljina	173.1 m
Širina	23.3 m
Visina	25 m
Gaz	11.5/9
Volumen lakog trupa	48677.5 m ³
Masa	24 853 t
Brzina ispod površine	27 čv
Brzina na površini	13 čv
Posada	163
Maksimalna dubina zarona	500 m
Operativna dubina zarona	380 m

4. ČVRSTOĆA, OPTIMIZACIJA I USPOREDBA ČVRSTIH TRUPOVA IZVEDENIH OD TITANA I HY-80

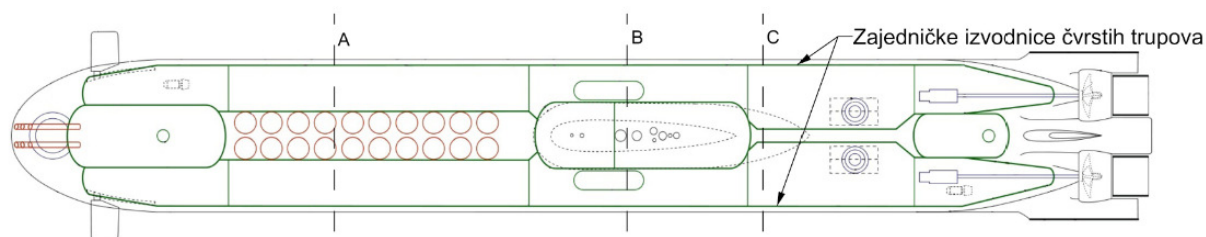
Proračun čvrstoće trupa je jedan od najbitnijih i najzahtjevnijih koraka projektiranja podmornice. Osim što čvrstoća podmornice mora zadovoljiti zadana opterećenja, tj. hidrostatske tlakove na dubini i do 500 metara, mora također biti i što otpornija na udare neprijateljskih torpeda, mina i ostalih vrsta oružja. Kod Typhoon klase je karakteristična mogućnost probijanja leda debelog i do 3 metra za što su dodatno ojačani pramac i nadgrađe.

Typhoon klasa podmornica je dvotrupna. To znači da ima vanjski hidrodinamički trup (laki trup) i unutarnji cilindrični trup (čvrsti trup). Koristi se cilindrični oblik jer se on pokazao najboljim u podnošenju visokih tlakova. Cilindri su na krajevima zatvoreni kalotama. Typhoon klasa unutar lakog trupa sadrži više cilindričnih čvrstih trupova od toga 5 habitabilnih, dvije kapsule za spas, tri balastna i 20 raketnih silosa. Ostali prostori se ovisno o poziciji pune morskom vodom ili služe kao manji balastni tankovi koji mogu isto podnijeti projektirana opterećenja (Slika 12) o čemu se više govori u poglavlju 6.3.3.



Slika 12. Shematski prikaz poprečnog presjeka na 84 m trupa Typhoon podmornice

Cijelom duljinom podmornice protežu se glavni trupovi, no kao što je vidljivo (Slika 13), ti trupovi na određenim pozicijama u podmornici mijenjaju promjer.

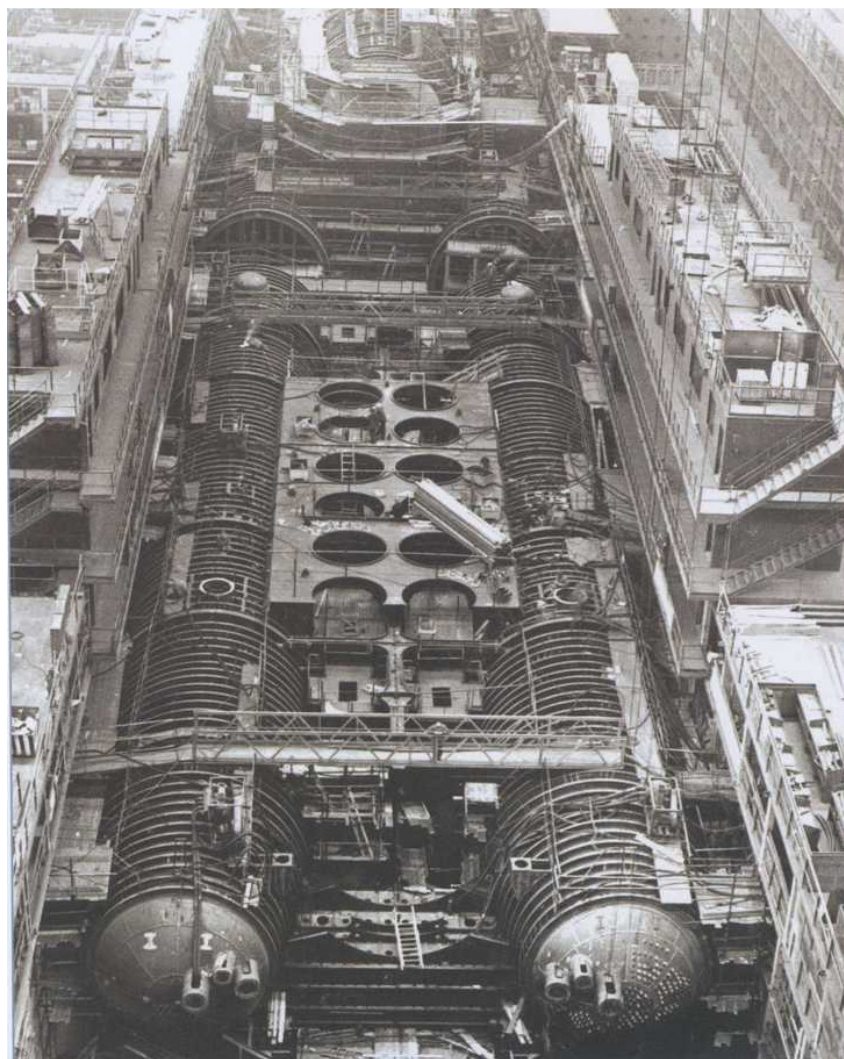


Slika 13. Tlocrtni prikaz rasporeda čvrstih trupova [13]

Na slici (Slika 13) se primjećuje da glavni trupovi (presjek A) imaju najmanji promjer u pramčanom dijelu podmornice, tj. u raketnom dijelu, a zatim se njihovi promjeri povećavaju na sredini podmornice (presjek B) i najveći promjer imaju na poziciji nuklearnog reaktora (presjek C). Također je vidljivo da dijelovi različitih promjera nisu međusobno koncentrični nego im je zajednička jedna izvodnica koja prolazi uz sam krajnji vanjski rub glavnih trupova (Slika 13).

Promjeri čvrstih trupova u području pramca iznose 7.2 m [14], dok je udaljenost oplata čvrstog od oplata lakog trupa u poprečnom presjeku podmornice iznosi 1.2 m. Imajući na umu da je promjer R-39 rakete 2.4 m [7], te da je širina podmornice 23.3 m dolazi se do dimenzijskih ograničenja konstrukcije. Naime, $2 (7.2+2.4+1.2) = 21.6$ m što ostavlja 1.7 m za izradu rebara raketnih silosa i čvrstih trupova. Budući da razmak lakog i čvrstog trupa iznosi 1.2 metra može se zaključiti da je ta udaljenost zapravo visina rebra koja bi se mogla podijeliti na dva dijela. Prvi dio visine rebra od cca 750 milimetara je dio konstrukcije lakog trupu, a ostali dio visine od 450 mm rebra je dio konstrukcije čvrstog trupa. Kako bi se zadržao kontinuitet strukture onda tu visinu rebro čvrstog trupa zadržava po cijelom svojem obodu pa tu visinu zadržava i u dijelu gdje su smješteni raketni silosi. S tom konstatacijom, na prije zaključenu sveukupnu širinu, može se dodati još 0.9 metra. 0.45 m s lijeve i desne strane raketnih silosa – to ograničenje vrijedi samo za pramčani dio čvrstog trupa zbog raketnih silosa, dok kod središnjeg dijela čvrstog trupa nema tog ograničenja. To čini sveukupnu širinu od 22.5 m što ostavlja 0.8 m za izvedbu konstrukcije silosa raketa.

Prema priloženim slikama (Slika 14, Slika 15) može se dokazati tvrdnja da se promjeri trupova mijenjaju po dužini podmornice. Na prvoj slici (Slika 14) prikazan je pramčani dio čvrstog trupa podmornice za vrijeme gradnje, dok je na drugoj slici (Slika 15) prikazan dio izvađenog trupa podmornice gdje je smješten nuklearni reaktor. Jasno se vidi da između čvrstih trupova u pramčanom dijelu postoji puno veći razmak nego na dijelu gdje su smješteni nuklearni reaktori, iz čega se zaključuje da su promjeri čvrstih trupova na tim pozicijama različiti. Analizom druge slike (Slika 15) utvrđeno je da promjer krmenog dijela glavnog trupa iznosi cca 9.2 m.

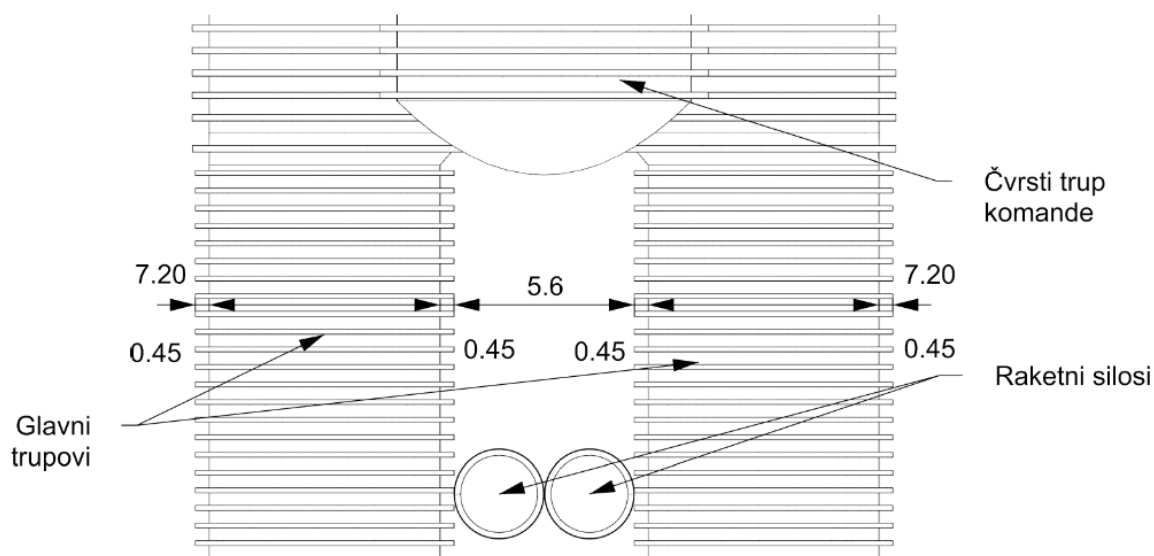


Slika 14. Arhivski snimak tijekom gradnje podmornice [15]

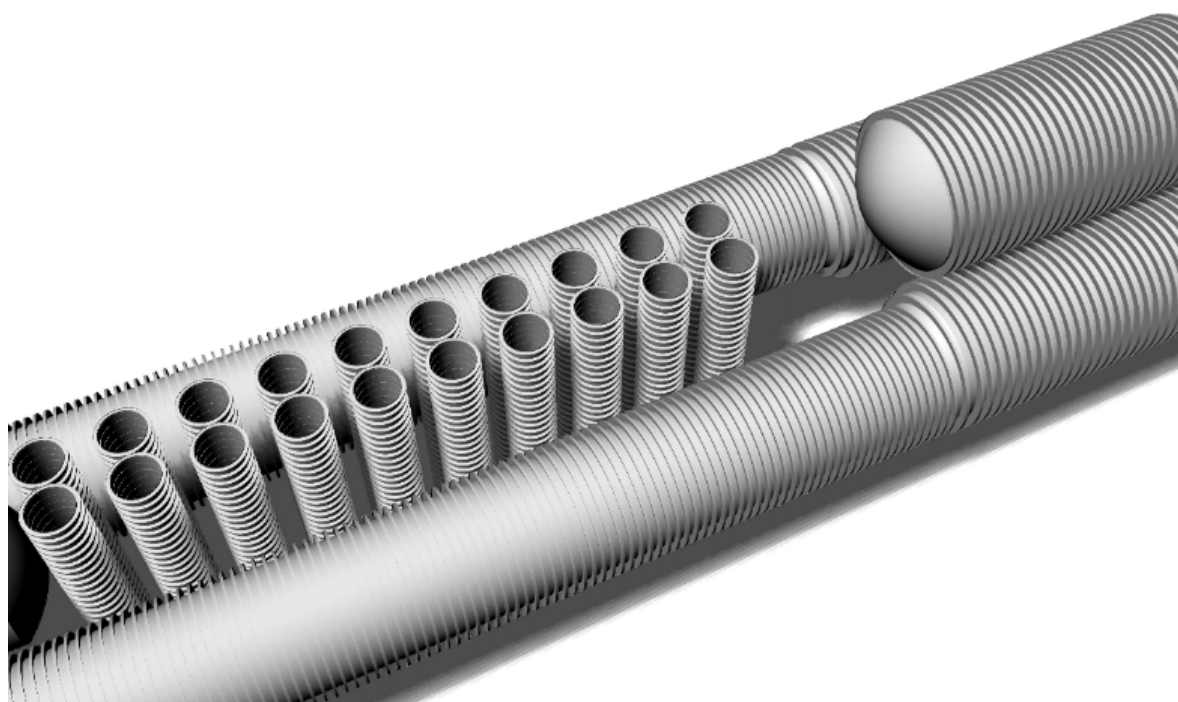


Slika 15. Izvađeni dio trupa s nuklearnim reaktorom [16]

Iz navedenih pretpostavki jedino još nedostaje promjer čvrstog trupa u središnjem dijelu podmornice. Budući da je promjer čvrstog trupa u pramčanom dijelu 7.2 m, a krmenog, tj. reaktorskog dijela je 9.2 m, a prema slici (Slika 13) vidljivo je da je promjer središnjeg dijela čvrstog trupa veći od pramčanog, a manji od reaktorskog, čime se usvaja da je promjer središnjeg dijela čvrstog trupa 8.1 m. Konačno, prikaz konstrukcije čvrstih trupova može se vidjeti na slijedećim slikama (Slika 16, Slika 17).



Slika 16. Tlocrtni prikaz čvrstih trupova s njihovim rebrima



Slika 17. 3-D prikaz čvrstih trupova i raketnih silosa s rebrima

4.1. Projektiranje konstrukcije podmornica klase Typhoon

Za materijal trupa pronađen je podatak da su čvrsti trupovi izrađeni od titanijuma [17] i taj podatak će se uzeti kao mjerodavan, no budući da titan ima skoro upola manji modul elastičnosti od podmorničkog čelika HY-80 onda će se, radi usporedbe, pored optimizacije trupa izvedenog od titanijske legure (Ti-6Al-4V - Grade 5) provesti i optimizacija trupa izvedenog od HY-80.

Operativna dubina ronjenja 380 metara dok je maksimalna dubina ronjenja 500 metara [18].

Proračun će se provesti za pramčani dio glavnog trupa (promjer 7.2 m) i središnji dio glavnog trupa (8.1 m). Primjerom će se prikazati proračun optimizacije za cilindar promjera 7.2 metara izrađenog od titana. Isti taj postupak koji će se prikazati proveden je za sve promjere cilindra, vrste materijala i razmaka rebara. Proračun koji će se prikazati u daljnjem tekstu temelji se na izvorima [19] i [20].

- Svojstva materijala:

Tablica 2. Fizička i mehanička svojstva te sastav HY-100 čelika i titanijske legure [21]

	HY-80	Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5)
Gustoća	7850 kg/m ³	4430 kg/m ³
Granica razvlačenja	552 MPa	880 MPa
Modul elastičnosti	205 GPa	113.8 GPa
Poissonov koeficijent	0.28	0.342
Modul smika	80 GPa	44 GPa

- Ograničenja s obzirom na dubinu ronjenja:

H_l - dubina ograničenja (limiting) = 380 m

H_d - projektna dubina = 500 m

ΔH - sigurnost od propadanja = 20 m

K_s - faktor sigurnosti

$$K_s = \frac{H_d}{H_l} = 1.316 \quad (1)$$

ρ - gustoća mora = 1025.87 kg/m³

g - gravitacija = 9.806650 m/s²

- r_c - polumjer promatranog cilindra = 3.6 m
- p_d - projektni tlak = $K_s \cdot \rho \cdot g \cdot (H_L + \Delta H) = 5.29 \cdot 10^6 \text{ Pa}$
- ρ_t - gustoća titana = 4430 kg/m^3
- σ_t - granica razvlačenja titana = $8.82 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- E_t - modul elastičnosti titana = $1.138 \cdot 10^8 \text{ Pa}$
- ν_t - poissonov koeficijent titana = 0.342

Kao što je navedeno, projektni zahtjev je dimenzionirati orebrenje cilindra promjera 7.2 m kod kojeg visina struka rebra s debljinom prirubnice ne smije prelaziti 45 cm. Također, trup treba izdržati projektni tlak.

4.2. Opis geometrijskih značajki rebra

- a - širina pojasa rebra
- h_f - širina pojasa rebra
- b - visina struka rebra
- h_s - debljina struka rebra
- h - debljina oplata
- l - razmak između rebara
- A - površina poprečnog presjeka rebra

Zbog pojednostavljenja proračuna, varijable a , h_f , b i h_s se zamjenjuju s površinom poprečnog presjeka rebra A . Također zbog pojednostavljenja proračuna i tehnološkog procesa prilikom odabira konačnih dimenzija, debljina prirubnice mora biti ista debljini oplata.

4.3. Funkcija cilja

Prilikom optimizacije potrebno je definirati cilj kako bi se moglo odabrati najpovoljnije rješenje. U ovoj optimizaciji cilj je da masa trupa podmornice bude što manja. To se najbolje može izraziti pomoću težinskog faktora koji se računa kao omjer mase samog trupa i istisnine vode koju uzrokuje sam trup.

Dakle:

$$f_G = \frac{G}{U} \quad (2)$$

Gdje su:

f_G - težinski faktor

G - težina cilindra širine jednog razmaka rebra

U - uzgon koji djeluje na cilindar širine razmaka jednog rebra

Težina cilindra G se definira preko sljedeće formule:

$$G = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot (A + l \cdot h) \quad (3)$$

A uzgon U se definira pomoću sljedeće relacije:

$$U = r^2 \cdot \pi \cdot l \cdot \rho \quad (4)$$

Što konačno daje konačni oblik težinskog faktora f_G :

$$f_G = \frac{G}{U} = \frac{2 \cdot r \cdot \pi \cdot \rho_t \cdot (A + l \cdot h)}{r^2 \cdot \pi \cdot l \cdot \rho} \quad (5)$$

Iz gornje jednadžbe jedine nepoznanice su h i A .

4.4. Proračun i funkcije ograničenja

Da bi se optimizacija mogla provesti potrebno je definirati funkcije koje omeđuju projektni prostor. Kada se te funkcije definiraju one se mogu skupa grafički prikazati čime se dobiva grafički prikaz projektnog prostora. Iz toga se pomoću težinskog faktora lako izabire zadovoljavajuće rješenje.

Funkcije ograničenja su:

- Funkcija ograničenja meridijalnog naprezanja
- Funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja
- Funkcije ograničenja naprezanja u orebrenju
- Funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja
- Težinska funkcija

4.4.1. Funkcija ograničenja meridijalnog naprezanja

Funkcija ograničenja meridijalnog naprezanja definira se preko sljedeće relacije:

$$A_1(h) = \frac{l \cdot h}{\lambda_1(h)} \quad (6)$$

Gdje su:

$A_1(h)$ - funkcija ograničenja meridijalnog naprežanja

$\lambda_1(h)$ - lambda funkcija meridijalnog naprežanja

$\lambda_1(h)$ se definira pomoću sljedećeg odnosa:

$$\lambda_1(h) = u(h) \cdot \left(\frac{1.543 \cdot F_4(h)}{N_1(h)} - F_3(h) \right) \quad (7)$$

Gdje su:

$u(h)$ - geometrijski parametar ljuske definiran pomoću sljedeće relacije:

$$u(h) = \left(\frac{\sqrt[4]{3(1-\nu_t^2)}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{r_c \cdot h}} \right) \quad (8)$$

$N_1(h)$ - N funkcija definirana kao

$$N_1(h) = \frac{\sigma_t}{p_d} \cdot \frac{h}{r} - 0.5 \quad (9)$$

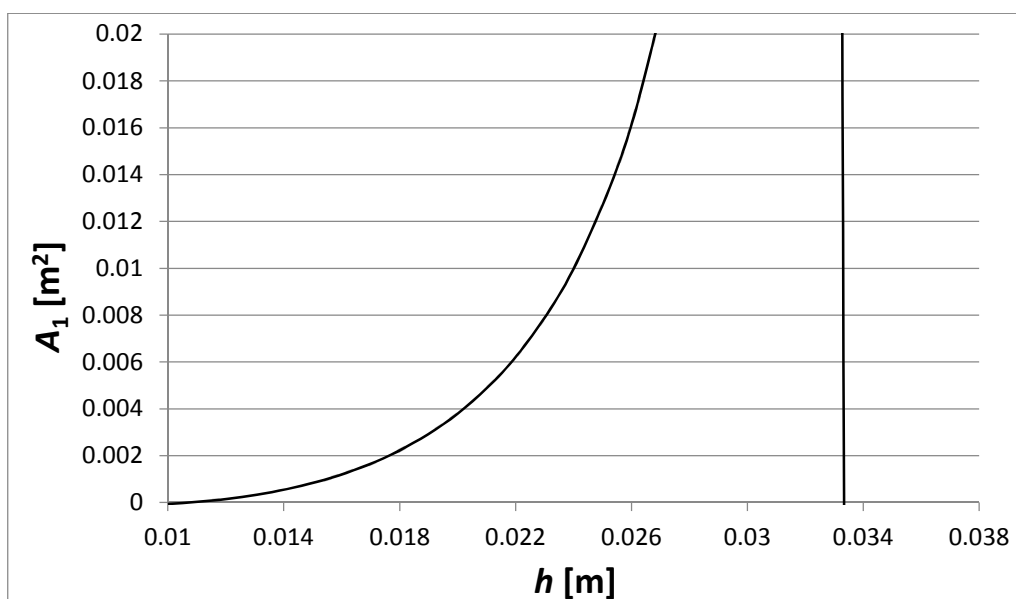
$F_3(h)$ - F funkcija geometrijskih karakteristika definirana kao:

$$F_3(h) = \frac{\sinh(2 \cdot u(h)) + \sin(2 \cdot u(h))}{\cosh(2 \cdot u(h)) - \cos(2 \cdot u(h))} \quad (10)$$

$F_4(h)$ - F funkcija geometrijskih karakteristika definirana kao:

$$F_4(h) = \frac{\sinh(2 \cdot u(h)) - \sin(2 \cdot u(h))}{\cosh(2 \cdot u(h)) - \cos(2 \cdot u(h))} \quad (11)$$

Kada se sve nepoznanice uvrste dobije se da je funkcija ograničenja meridijalnog naprežanja površina rebra koja je u funkciji s debljinom oplata h (Slika 18).



Slika 18. Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja meridijalnog naprežanja o debljini oplata

Projektni prostor se nalazi između dviju linija. Lijevo od lijeve linije nalazi se područje gdje su aksijalna opterećenja veća od dozvoljenih (veća od granice tečenja - $\sigma_1 > \sigma_t$), na samoj lijevoj liniji je granica gdje je aksijalno opterećenje jednako dozvoljenom (jednako granici tečenja - $\sigma_1 = \sigma_t$), a područje između lijeve i desne linije je područje gdje je aksijalno opterećenje manje od dozvoljenog (manje od granice tečenja - $\sigma_1 < \sigma_t$). Desno od okomite linije se nalaze neprihvatljiva rješenja.

4.4.2. Funkcije ograničenja cirkularnog naprežanja

Funkcije ograničenja cirkularnog naprežanja definiraju se preko sljedećih relacija:

$$A_{21}(h) = \frac{l \cdot h}{\lambda_{21}(h)} \quad (12)$$

$$A_{22}(h) = \frac{l \cdot h}{\lambda_{22}(h)} \quad (13)$$

Gdje su:

$A_{21}(h)$ - funkcije ograničenja cirkularnog naprežanja za plastično izvijanje

$A_{22}(h)$ - funkcije ograničenja cirkularnog naprežanja za elasto-plastično izvijanje

$\lambda_{21}(h)$ - lambda funkcija cirkularnog naprežanja za plastično izvijanje definirana kao:

$$\lambda_{21}(h) = u(h) \cdot \left(\frac{0.85 \cdot F_1(h)}{N_{21}(h)} - F_3(h) \right) \quad (14)$$

Gdje su:

$u(h)$ - iz (8)

$N_{21}(h)$ - N funkcija definirana kao

$$N_{21}(h) = 1 - 0.8 \cdot \left(\frac{\sigma_t}{p} \cdot \frac{h}{r} \right) \quad (15)$$

$F_1(h)$ - F funkcija geometrijskih karakteristika definirana kao:

$$F_1(h) = 2 \cdot \frac{\cosh(u(h))\sin(u(h)) + \sinh(u(h))\cos(u(h))}{\cosh(2 \cdot u(h)) - \cos(2 \cdot u(h))} \quad (16)$$

$F_3(h)$ - iz (10)

$\lambda_{22}(h)$ - lambda funkcija cirkularnog naprezanja za elasto-plastično izvijanje definirana pomoću sljedeće jednadžbe

$$\lambda_{22}(h) = u(h) \cdot \left(\frac{1.543 \cdot F_4(h)}{N_1(h)} - F_3(h) \right) \quad (17)$$

Gdje su:

$u(h)$ - iz (8)

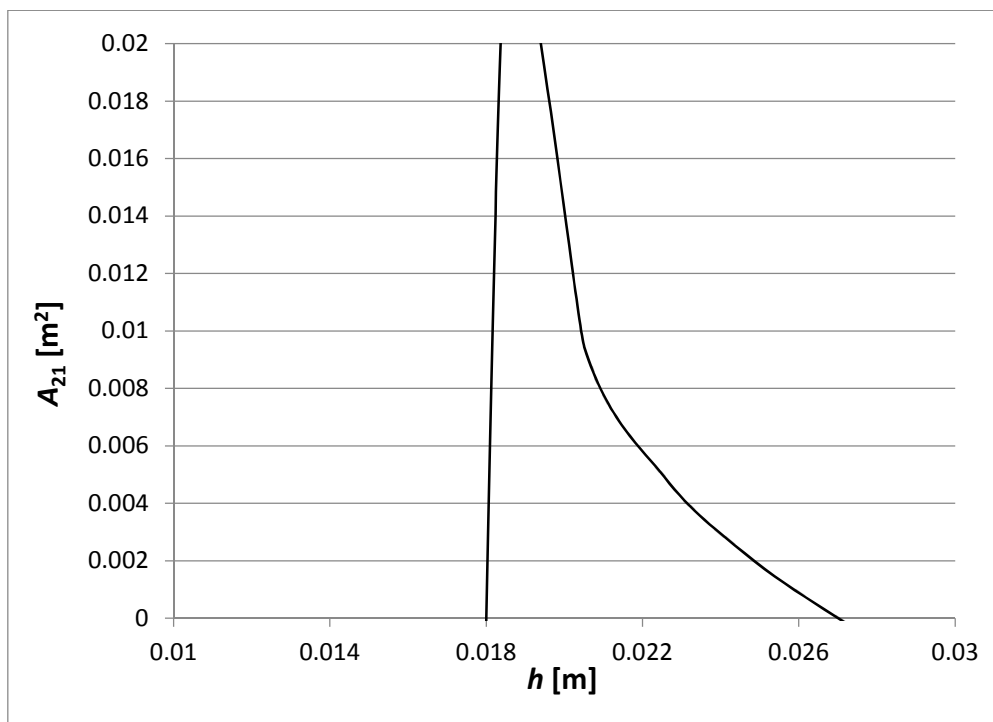
$N_{22}(h)$ - N funkcija definirana kao

$$N_{22}(h) = 1 - \frac{0.36 \cdot \sigma_t}{\frac{p \cdot r}{h} - E_t \cdot \frac{h}{r} \cdot \frac{0.12}{u(h) - 0.367}} \quad (18)$$

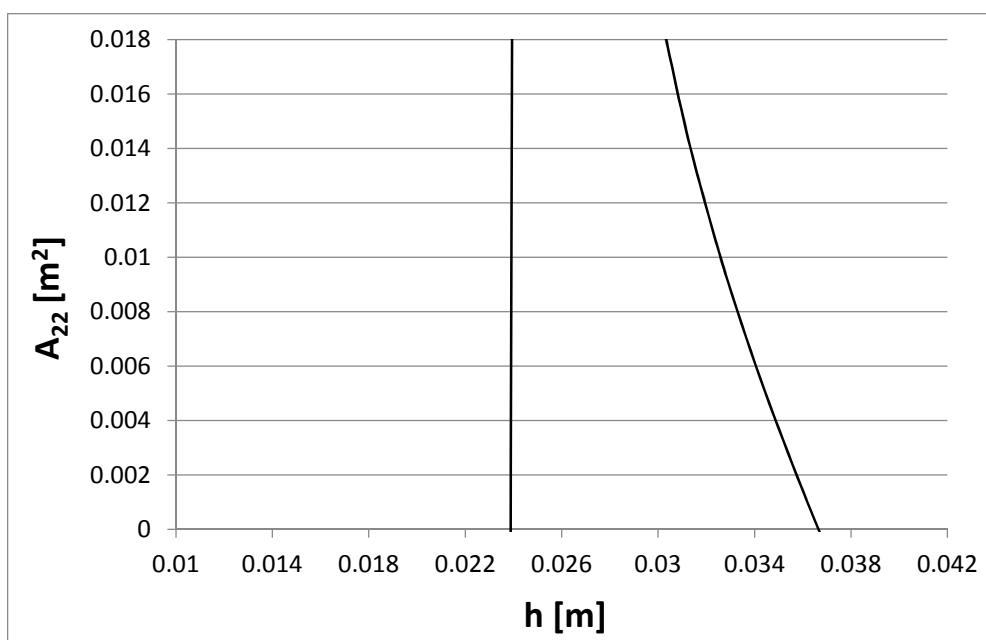
$F_1(h)$ - iz (16)

$F_3(h)$ - iz (10)

Kada se sve nepoznanice uvrste također se dobije da su funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja površine rebra koje su u funkciji s debljinom oplata h (Slika 18).



Slika 19. Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja za plastično izvijanje o debljini oplata



Slika 20. Grafički prikaz ovisnosti funkcije ograničenja cirkularnog naprezanja za plastično-elastično izvijanje o debljini oplata

Na slikama (Slika 19, Slika 20) prostor između nacrtanih linija je pozitivan na plastično izvijanje, odnosno plastično-elastično izvijanje, stoga rješenje unutar tih linija nije prihvatljivo. Rješenje se nalazi „izvan“ linija.

4.4.3. Funkcije ograničenja naprezanja u orebrenju

Funkcije ograničenja naprezanja u orebrenju definiraju se preko sljedećih izraza:

$$A_{31}(h) = \frac{l \cdot h}{\lambda_{31}(h)} \quad (19)$$

$$A_{32}(h) = \frac{l \cdot h}{\lambda_{32}(h)} \quad (20)$$

Gdje su:

$A_{31}(h)$ - funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti

$A_{32}(h)$ - funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za opće nestabilnosti

$\lambda_{31}(h)$ - lambda funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti definirana kao:

$$\lambda_{31}(h) = \frac{u(h) \cdot F_3(h)}{N_{31}(h)} \quad (21)$$

Gdje su:

$u(h)$ - iz (8)

$N_{31}(h)$ - N funkcija definirana kao

$$N_{31}(h) = \frac{1.7 \cdot p_d \cdot r}{h \cdot \sigma_t} - 1 \quad (22)$$

$F_3(h)$ - iz (10)

$\lambda_{32}(h)$ - lambda funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj opće nestabilnosti definirana kao:

$$\lambda_{32}(h) = \frac{-B_0(h) + \sqrt{B_0^2(h) + 4B_0(h) \cdot C_0(h)}}{2 \cdot A_0(h)} \quad (23)$$

Gdje su:

$B_0(h)$ - funkcija definirana sljedećom relacijom:

$$B_0(h) = \frac{8 \cdot p_d \cdot r^3}{E_t} \cdot u(h) \cdot F_3(h) - b^2 \cdot h \cdot (4 + 2 \cdot k \cdot u(h) \cdot F_3(h)) \quad (24)$$

k - omjer odnosa širine prirubnice s i razmaka rebra l tj.

$$k = \frac{a}{l} \quad (25)$$

Omjer k je uveden kao parametar koji omogućava da se osigura projektom određeni prostor između rebara za smještaj opreme u slučaju da se orebrenje nalazi s unutrašnje strane cilindra. U tom slučaju općenito se uzima da k iznosi 0.18. U ovom slučaju, cilindar čvrstog trupa orebren je s vanjske stoga nema potrebe za tako strogim koeficijentom, a i njegovim povećanjem se omogućava proširenje prirubnice čime se direktno utječe na povećanje momenta tromosti presjeka rebra. Odabrani k iznosi:

$$k = 0.28$$

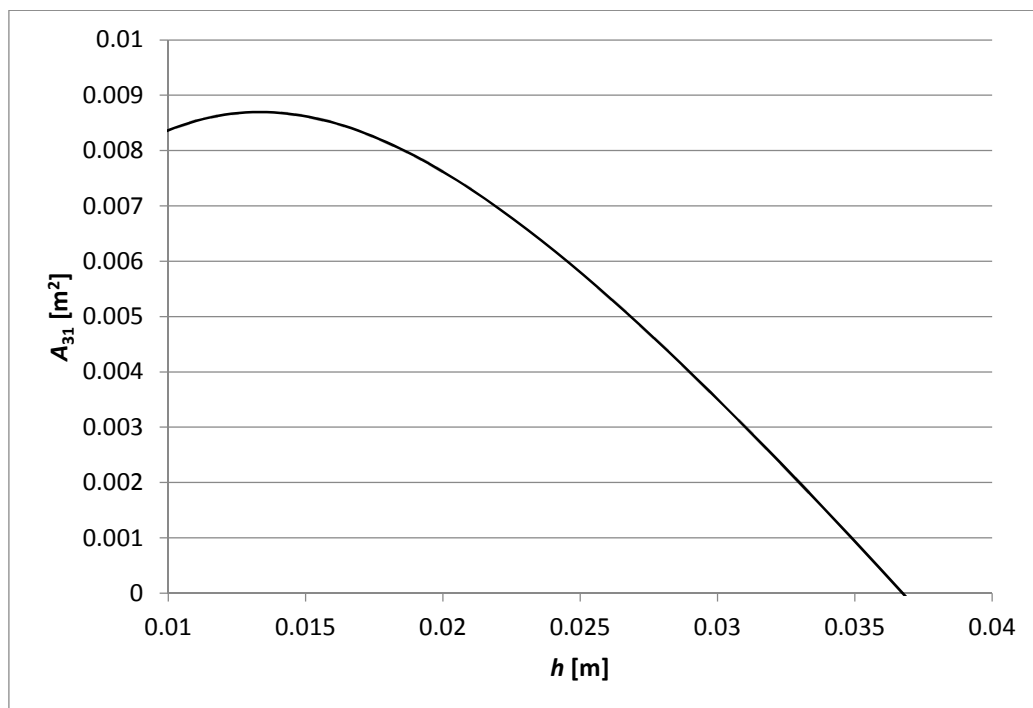
$A_0(h)$ - funkcija definirana sljedećom relacijom:

$$A_0(h) = \frac{8 \cdot p_d \cdot r^3}{E_t} - b^2 \cdot k \cdot h \cdot (8 - 3 \cdot k \cdot u(h) \cdot F_3(h)) \quad (26)$$

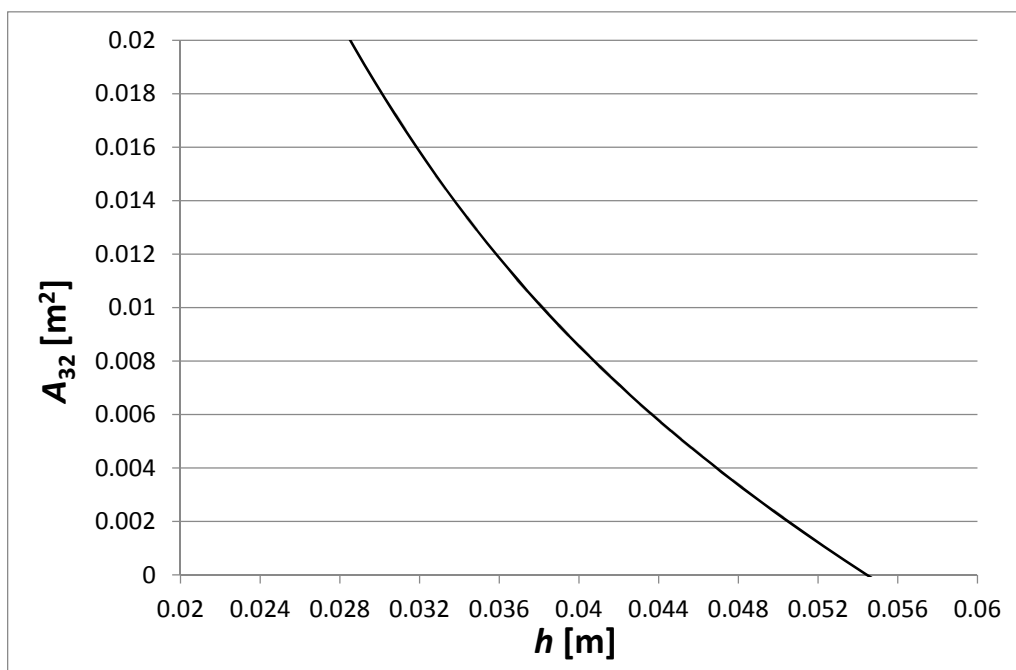
$C_0(h)$ - funkcija definirana sljedećom relacijom:

$$C_0(h) = b^2 \cdot h \cdot u(h) \cdot F_3(h) \quad (27)$$

Uvrštavanjem svih nepoznanica također se dobiva da su funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti i funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za opću nestabilnost u funkciji s debljinom oplata h . Grafički prikazi tih naprezanja prikazani su sljedećim slikama (Slika 21, Slika 22).



Slika 21. Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za slučaj plastične nestabilnosti o debljini oplata



Slika 22. Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja naprezanja u orebrenju za opće nestabilnosti o debljini oplata

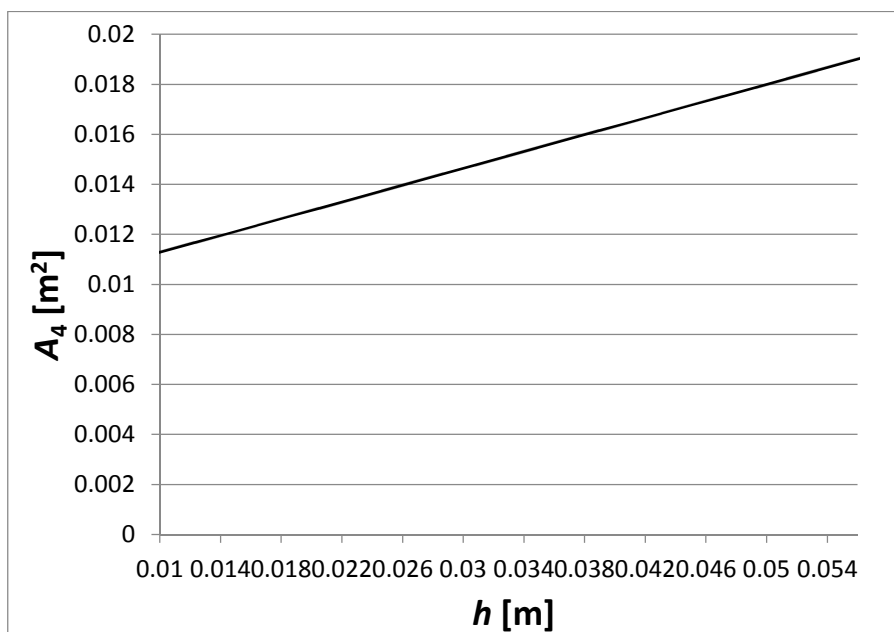
Na obje slike (Slika 21, Slika 22) ispod linije se nalazi područje pozitivno na plastičnu deformaciju, odnosno na opću nestabilnost, što je neprihvatljivo rješenje. Područja sa prihvatljivim rješenjem se nalaze iznad linije.

4.4.4. Funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja

Funkcije ograničenja za izvijanje orebrenja definiraju se preko sljedećih relacija:

$$A_4(h) = 0.06 \cdot h_s^2 + a \cdot l \cdot h \quad (28)$$

Iz gornje jednadžbe vidi se da je funkcija A_4 pravac (Slika 23).



Slika 23. Grafički prikaz ovisnosti funkcija ograničenja za izvijanje orebrenja o debljini oplave

4.4.5. Težinska funkcija ograničenja

Težinska funkcija definirana je preko sljedeće formule:

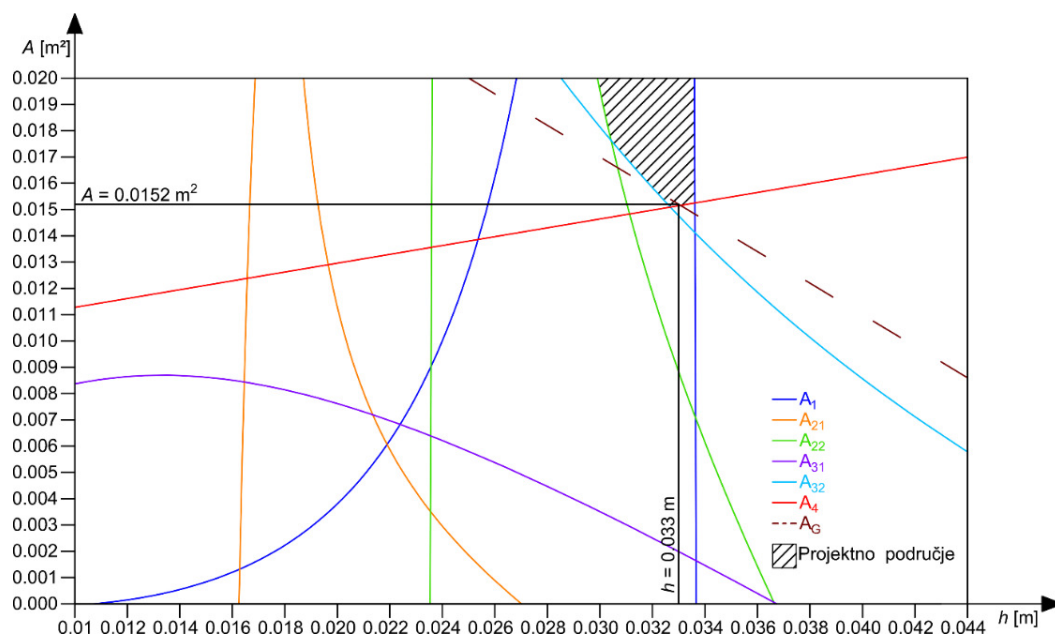
$$A_G(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{\rho_T} \cdot l \cdot (r_C \cdot f_G - h) \quad (29)$$

Gdje je:

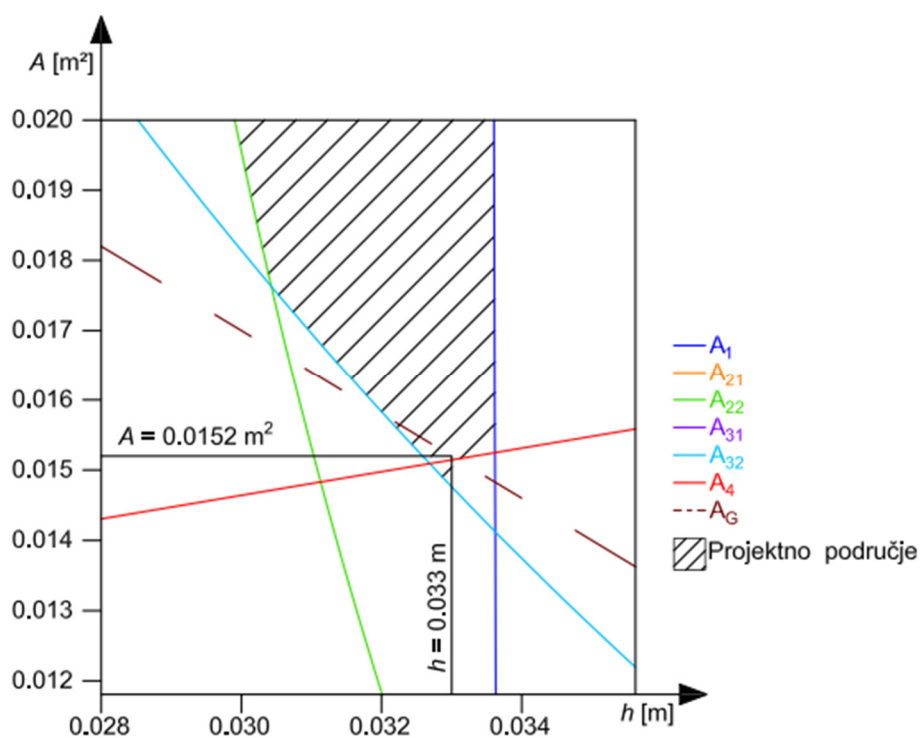
f_G – iz (5) - težinska funkcija koja se definira tako da se u projektnom prostoru iz slike (Slika 24) odabere optimalno rješenje čime se ujedno odabiru optimalni h i A koji su u poglavlju 4.3. definirani kao jedine nepoznanice prilikom računanja težinske funkcije.

4.4.6. Grafički prikaz projektnih prostora

Na sljedećoj slici (Slika 24) prikazan je projektni prostor za cilindar promjera 7.2 m izrađenog od titana razmaka rebara 0.6 m. Taj razmak rebara se za taj promjer cilindra proračunom pokazao kao optimalnim što će biti objašnjeno u daljnjem tekstu.



Slika 24. Projektni prostor za razmak rebara 0.6 m izrađenog od titana promjera 7.2 m



Slika 25. Uvećani prikaz projektnog područja

Odabrano rješenje sa slika (Slika 24 i Slika 25) je $h=0.033$ m i $A=0.0152$ m². Rješenje koje bolje tangira linije A_{32} i A_4 je $h=0.0327$ (odnosno 3.27 cm) i $A=0.0152$ m², no ono nije odabrano jer tehnološki nije moguće izvesti lim debljine u većoj točnosti od 0.1 cm. Prvo rješenje unutar projektnog prostora debljine lima koju je moguće izvesti je $h=3.3$ cm i $A=0.0152$ m². Težinska funkcija za odabrano rješenje iznosi: $f_G=0.13994$. Istim tim principom odabrana su rješenja za

sve varirane razmake rebara, oba promjera cilindra izvedenih od oba razmatrana materijala. Ostala rješenja se nalaze u nastavku (Tablica 3, Tablica 4).

4.4.7. Prikaz svih rezultata

Tablica 3. Rezultati optimizacije čvrstih trupova za HY-80

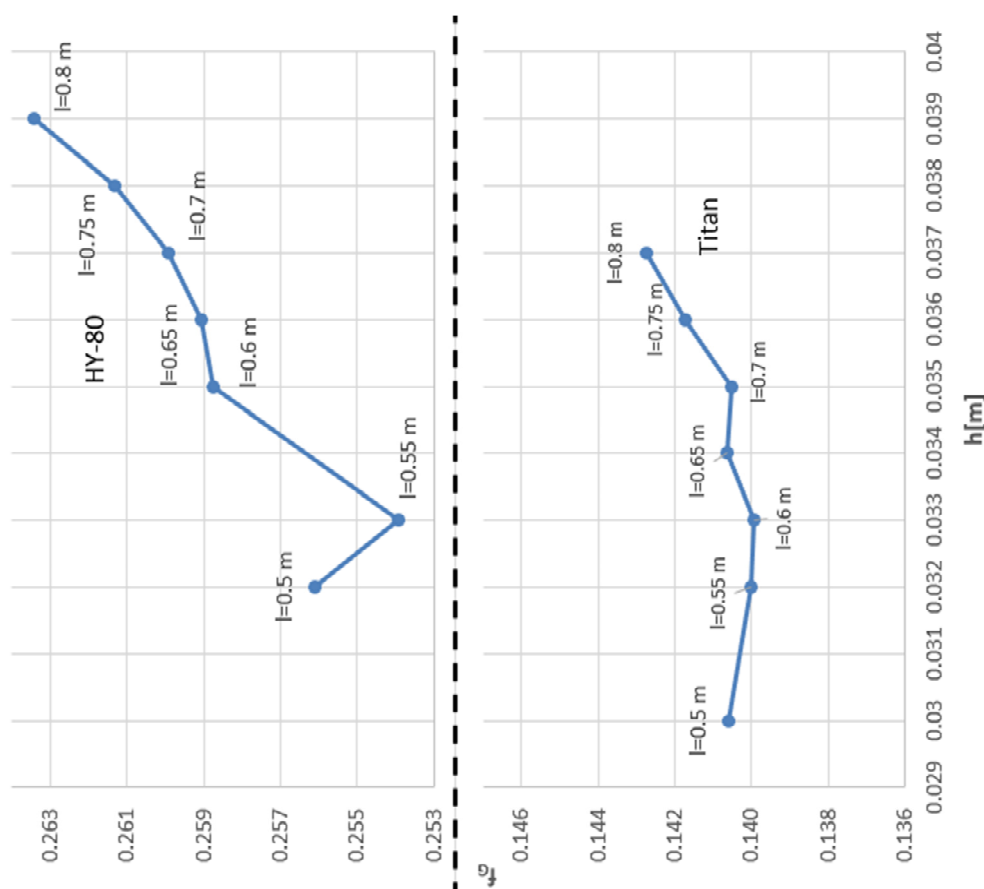
HY-80	r= 3.6m	l [m]	h [m]	A [m ²]	f_G	a [m]
		0.5	0.032	0.01412	0.2561	0.14
		0.55	0.033	0.0147	0.2539	0.154
		0.6	0.035	0.01552	0.2587	0.168
		0.65	0.036	0.01621	0.2590	0.182
		0.7	0.037	0.0169	0.2599	0.196
		0.75	0.038	0.0176	0.2613	0.21
		0.8	0.039	0.01837	0.2634	0.224
	r= 4.05m	0.6	0.037	0.0161	0.2412	0.168
		0.65	0.038	0.01655	0.2398	0.182
		0.7	0.039	0.0173	0.2407	0.196
		0.75	0.040	0.01805	0.2420	0.21
		0.8	0.041	0.01885	0.2439	0.224
		0.85	0.042	0.0197	0.2462	0.238
		0.9	0.043	0.0205	0.2485	0.252

Tablica 4. Rezultati optimizacije čvrstih trupova za titan

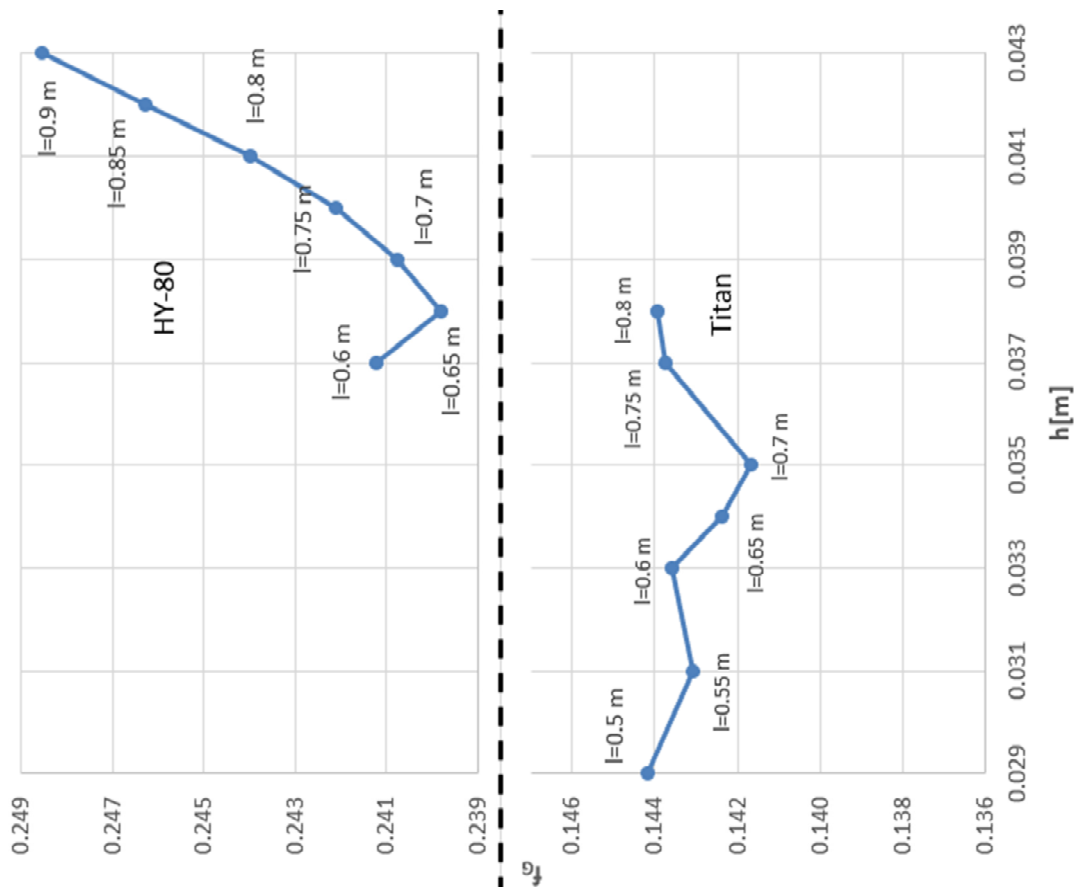
Titan	r= 3.6m	l [m]	h [m]	A [m ²]	f_G	a [m]
		0.5	0.030	0.0143	0.1406	0.140
		0.55	0.032	0.0145	0.1400	0.154
		0.6	0.033	0.0152	0.1399	0.168
		0.65	0.034	0.0160	0.1406	0.182
		0.7	0.035	0.0165	0.1405	0.196
		0.75	0.036	0.0173	0.1417	0.210
		0.8	0.037	0.0180	0.1427	0.224
	r= 4.05m	0.5	0.029	0.0193	0.1442	0.140
		0.55	0.031	0.0196	0.1431	0.154
		0.6	0.033	0.0206	0.1436	0.168
		0.65	0.034	0.0213	0.1424	0.182
		0.7	0.035	0.0220	0.1417	0.196
		0.75	0.037	0.0228	0.1437	0.210
		0.8	0.038	0.0236	0.1440	0.224

U tablicama (Tablica 3, Tablica 4) navedeno je koja debljina, poprečna površina i širina priрубnice rebara zadovoljava projektne zahtjeve. Iz tablica se može primijetiti da rebro izrađeno od titana zahtjeva nešto tanju debljinu oplata, ali zato zahtjeva nešto veću površinu poprečnog presjeka rebra od HY-80, ali titan ima veliku prednost pred HY-80. Projektni cilj da faktor f_G bude što manji ipak je najmanji kod titana za oba razmatrana cilindra i to u prosjeku za više od 0.1 što znači 10 % lakša struktura koja, analogno, zahtjeva 10% manje uzgona koji ju treba podupirati. To omogućava mogućnost smještaja više opreme i veću nepotonivost u slučaju proboja čvrstog trupa. Iako oba materijala zadovoljavaju kriterij čvrstoće, ipak je dodatno potvrđeno da je vjerojatnije da se titan koristio u izgradnji čvrstih trupova upravo zbog njegove lakše strukture, ali i svojstvo bolje korozijske otpornosti.

Slijedeće, treba u tablici (Tablica 4) pronaći optimalni razmak rebra za cilindre promjera 7.2 i 8.1 m. Kriterij za odabir optimalnog razmaka rebra, kako je napomenuto, je što niža težinska funkcija f_G . Na slikama (Slika 26, Slika 27) su grafički prikazani i uspoređeni rezultati iz tablica (Tablica 3, Tablica 4).



Slika 26. Grafički prikaz odnosa težinske funkcije f_G i debljina oplata rebra h za optimalna rješenja cilindra promjera 7.2m izrađenog od HY-80 i titana



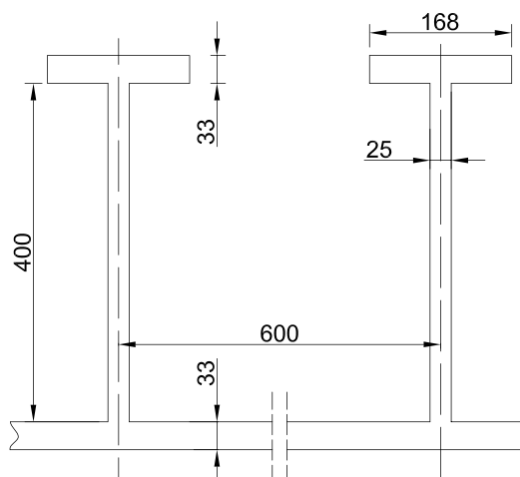
Slika 27. Grafički prikaz odnosa težinske funkcije f_G i debljine oplata rebra h za optimalna rješenja cilindra promjera 8.1m izrađenog od HY-80 i titana

4.5. Dimenzije rebra za optimalno rješenje

Kod konačno dobivenog razmaka rebra jedino još treba provjeriti da li je moguće za zadanu površinu rebra dobiti zahtijevanu sveukupnu visinu struka i debljinu prirubnice od 45 cm. Konačne dimenzije rebra cilindra izrađenog od titana promjera 7.2 m prikazane su slikom (Slika 28). Budući da za promjer cilindra od 8.1 m nema ograničenja za visinu rebra onda se ono neće niti provjeravati.

Odabrane dimenzije cilindra su:

Razmak između rebara	$l = 600 \text{ mm}$
Debljina oplata	$h = 33 \text{ mm}$
Visina struka rebra	$b = 288 \text{ mm}$
Debljina struka rebra	$h_s = 40 \text{ mm}$
širina pojasa	$a = 168 \text{ mm}$



Slika 28. Geometrijska svojstva rebra

Debljina pojasa rebra $h_t=33$ mm

Površina rebra $A=15544$ mm²

Budući da je nova površina rebra zbog tehnoloških razloga malo veća nego što je to proračunski potrebno onda se mora ponovo izračunati težinska funkcija f_G . f_G iznosi

$$f_G=0.14132$$

Pri čemu f_G za cilindar promjera 8.1 m iznosi 0.1417 što pokazuje kako konstrukciju kod oba cilindra podupire 14% uzgona, dok se ostatak može koristiti u druge svrhe poput smještaja opreme, naoružanja ili kao sigurnost, tj. kao rezerva istisnine za veću nepotonivost.

4.6. Stabilnost trupa

Budući da je titan usvojen kao strukturni materijal Typhoon klase podmornica, onda će se stabilnost trupa provesti samo za cilindre izrađene od titana promjera 7.2 m i 8.1 m.

Da bi se mogao provesti proračun stabilnosti trupa potrebno je izračunati moment tromosti I presjeka rebra. Za to je potrebno odrediti sunosivu širinu. Sunosiva širina se računa prema slijedećem izrazu [22]:

$$L_{ef} = \frac{2}{\sqrt[4]{3(1-\nu_t^2)}} \sqrt{r \cdot h} \quad (30)$$

Gdje su:

L_{ef} – sunosiva širina [m]

ν_t – poissonov koeficijent titana

r – radijus promatranog rebra [m]

h – debljina lima za promatrano rebro [m]

Što za oba promjera daje slijedeće rezultate:

Za cilindar promjera 7.2 m - $L_{ef}=0.540$ m

- $I = 0.001018862$ m⁴

Za cilindar promjera 8.1 m - $L_{ef}=0.590$ m

- $I = 0.00198$ m⁴

4.6.1. Izvijanje oplata između rebara

Kritično naprezanje prema von Misesu se računa prema slijedećoj formuli [20] :

$$p_{cl}(n) = E_t \cdot \frac{h}{r} \cdot \frac{1}{n^2 + 0.5 \cdot \alpha^2} \cdot \left(\frac{\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{1}{12(1 - \nu_t^2)} \cdot \left(\frac{h}{r} \right)^2 \cdot (n^2 + \alpha^2)^2 \right) \quad (31)$$

Gdje su

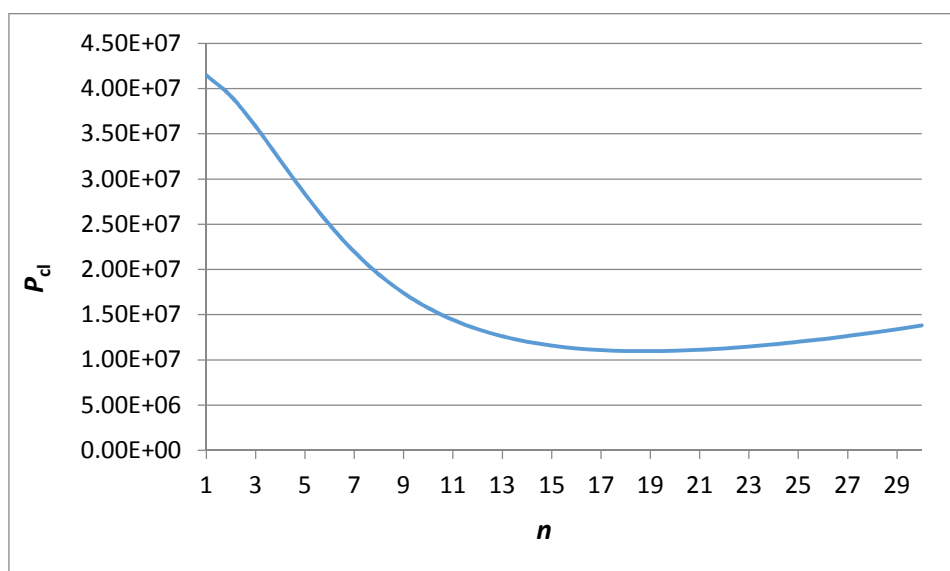
P_{cl} – kritično naprezanje

n – broj poluvalova u radijalnom smjeru

$$\alpha = \frac{r \cdot \pi}{l} \quad (32)$$

4.6.1.1. Izvijanje oplata između rebara za promjer cilindra 7.2m

Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova prikazan je slijedećom slikom (Slika 29).



Slika 29. Odnos kritičnog naprezanja i broja polu-valova n za promjer cilindra od 7.2 m

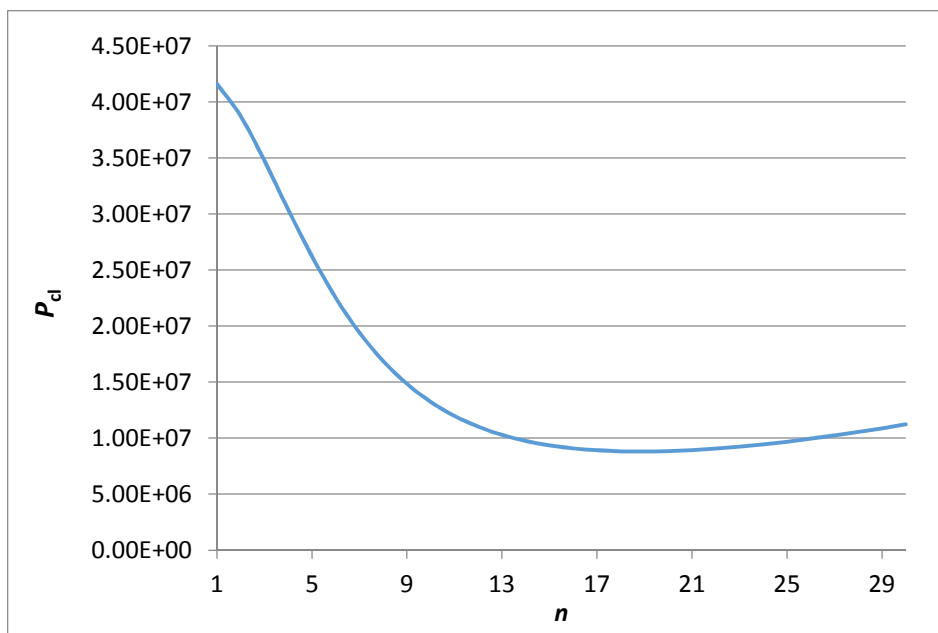
Minimalno kritično naprezanje od $1.1 \cdot 10^7$ Pa događa se prilikom 19 poluvalova.

Uz faktor sigurnosti od 10% omjer kritičnog naprezanja i projektiranog tlaka mora biti u slijedećem odnosu:

$$\frac{p_{cl}}{p_d} \geq 1.1 \quad (33)$$

Stvarni odnos iznosi 2.07 što udovoljava zahtjevima.

4.6.1.2. Izvijanje oplata između rebara za promjer cilindra 8.1m



Slika 30. Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova n za promjer cilindra od 8.1m

Minimalno kritično naprezanje od $8.81 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ događa se prilikom 19 poluvalova a omjer kritičnog naprezanja i projektiranog tlaka iznosi 1.66 što udovoljava zahtjevima.

4.6.2. Izvijanje orebrene oplata između pregrada

Kritično naprezanje prema von Misesu se računa prema slijedećoj formuli:

$$p_{cL}(m) = \frac{E_t}{m^2 + 0.5 \cdot \beta^2} \cdot \left(\frac{h}{r} \cdot \frac{\beta^4}{(m^2 + \beta^2)^2} + \frac{l}{r^3 \cdot l} \cdot (m^2 - 1 + \beta^2)^2 \right) \quad (34)$$

Gdje su

P_{cL} – kritično naprezanje [Pa]

m – broj poluvalova u aksijalnom smjeru

$$\beta = \frac{r \cdot \pi}{L} \quad (35)$$

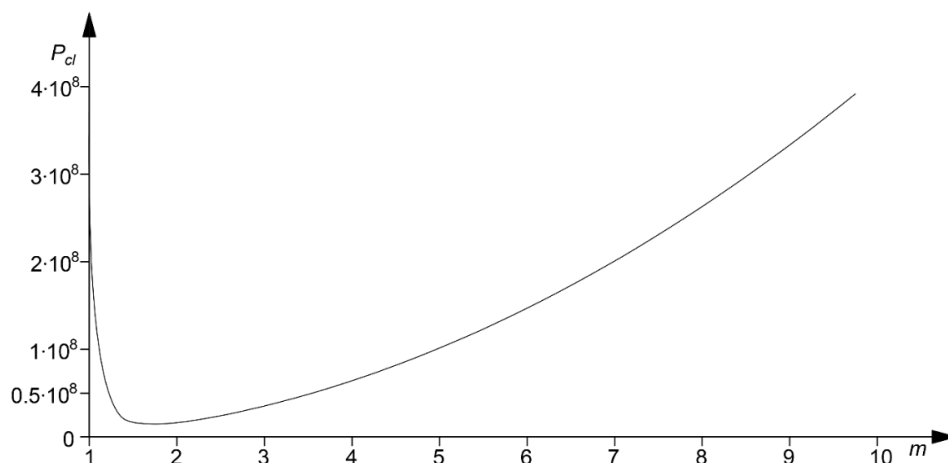
L – udaljenost između nepropusnih pregrada [m]

Typhoon klasa ima 19 nepropusnih odjeljaka [23] od kojih su tri manja nepropusna čvrsta trupa koja se nalaze na simetrali podmornice između glavnih trupova kako je opisano u poglavlju 3. To znači da su glavni trupovi, koji se protežu cijelom duljinom podmornice podijeljeni na 16 nepropusnih odjeljaka tj. svaki na 8. Izrađenim kompjutorskim 3-D modelom Typhoon

podmornice i njezine unutrašnjosti prema dostupnim slikama i podacima dobivena je udaljenost između nepropusnih pregrada za cilindar promjera 7.2 m je 17 m, dok je za cilindar promjera 8.1 m 18.4 m.

4.6.2.1. Izvijanje orebrene oplata između pregrada za promjer cilindra 7.2m

Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova prikazan je sljedećom slikom (Slika 31).



Slika 31. Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova m za promjer cilindra od 7.2m

Minimalno kritično naprezanje od $1.85 \cdot 10^7$ Pa događa se prilikom 2 poluvala.

Zbog materijalne i izvedbene nesavršenosti kritično naprezanje se množi s faktorom η_1 koj iznosi 0.75, a zbog promjene modula elastičnosti u plastičnoj domeni kritično naprezanje se množi s faktorom η_2 koji iznosi 0.768.

Kritično naprezanje pomnoženo s navedenim faktorima iznosi:

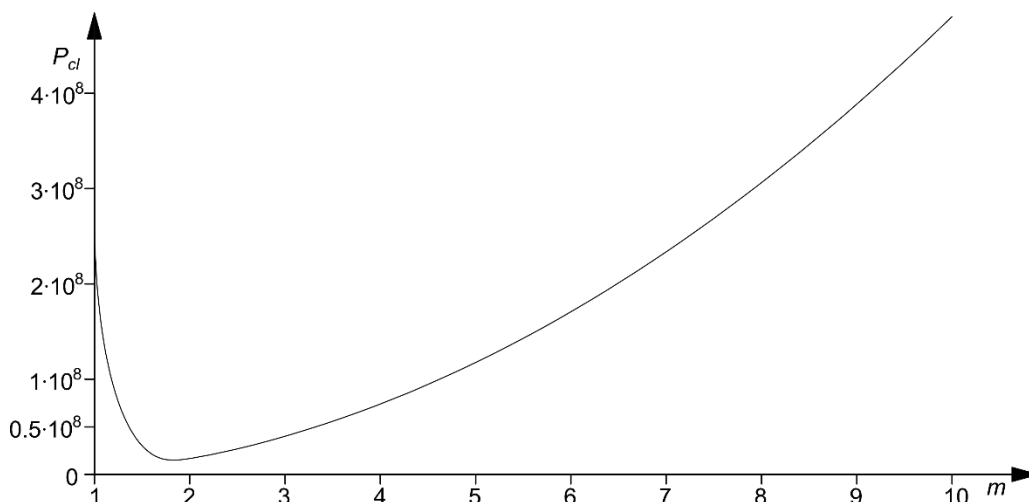
$$P_{cL} = 1.06 \cdot 10^7 \text{ [Pa]}$$

Uz faktor sigurnosti od 40% omjer kritičnog naprezanja i projektiranog tlaka mora biti u sljedećem odnosu:

$$\frac{p_{cl}}{p_d} \geq 1.4 \quad (36)$$

Odnos iznosi 2.01 što udovoljava zahtjevima.

4.6.2.2. Izvijanje orebrene oplata između pregrada za promjer cilindra 8.1m



Graf 1. Odnos kritičnog naprezanja i broja poluvalova m za promjer cilindra od 8.1m

Minimalno kritično naprezanje od $2.15 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ događa se prilikom 2 poluvala.

Kritično naprezanje pomnoženo s navedenim faktorima navedenim u poglavlju 4.6.2.1 iznosi:

$$P_{cL} = 1.24 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

Odnos kritičnog naprezanja i projektiranog tlaka iznosi 2.34 što udovoljava zahtjevima.

4.7. Zaključak analize čvrstoće čvrstog trupa

Iako je titan kao materijal skup ipak je moguće da je on upotrebljen kao konstrukcijski materijal. Podmornice Typhoon klasa građene su početkom 80-ih u vrijeme SSSR-a što znači da titan nije nabavljen po tržišnoj cijeni nego je za njega plaćena samo njegova eksploatacija ili čak i ništa zbog državnih interesa. Također, titan je teško zavarljiv, no prema literaturi u SSSR-u je od titana izrađena Alfa klasa podmornica još 1977. godine što znači da je tokom njihove izgradnje akumulirano potrebno znanje koje je omogućilo izgradnju velikih podmornica poput Typhoon podmornica. Velika prednost upotrebe titana kao konstrukcijskog materijala je manja gustoća i visoka otpornost na koroziju te nemagnetičnost što ga čini idealnim za primjenu na podmornicama.

Ovim proračunom je dokazana tvrdnja da je Typhoon klasa izrađena od titana i to tako da su zadovoljeni svi konstrukcijski zahtjevi poput visine rebra koja direktno utječe na širinu same podmornice.

5. NAORUŽANJE I OPREMA

Oprema se može podijeliti na tri cjeline, oprema potrebna za život posade, oprema potrebna za funkcioniranje same podmornice i vojna oprema s naoružanjem.

5.1. Oprema za posadu

5.1.1. Smještaj i život posade

Na Typhoonu klasi podmornica služi 163 članova posade [18] od čega su 52 časnika i 85 dočasnika. Zbog veličine podmornice smještaj posade je luksuzan u odnosu na ostale podmornice. Čak su i obični mornari smješteni u četverokrevetne kabine dok su viši činovnici smješteni u jednokrevetne ili dvokrevetne kabine opremljene sa pisaćim stolom i TV-om.

Članovi posade imaju i osiguranu razonodu. Na Typhoon podmornici nalazi se sauna kapaciteta za 5 osoba [25]. Sauna je obložena hrastovinom koja prilikom viših temperatura pušta mirise koji gode radu pluća (Slika 33). Na podmornici se također nalazi i manji bazen dimenzija 4×2×2 m te ima mogućnost punjenja slatkom, slanom, toplom ili hladnom vodom (Slika 32). Typhoon klasa podmornica sadrži teretanu (Slika 34), sobu za razonodu s pušačkim dijelom, ljubimce (kavezi s pticama te akvarij s ribama)(Slika 35) te čak i masera.

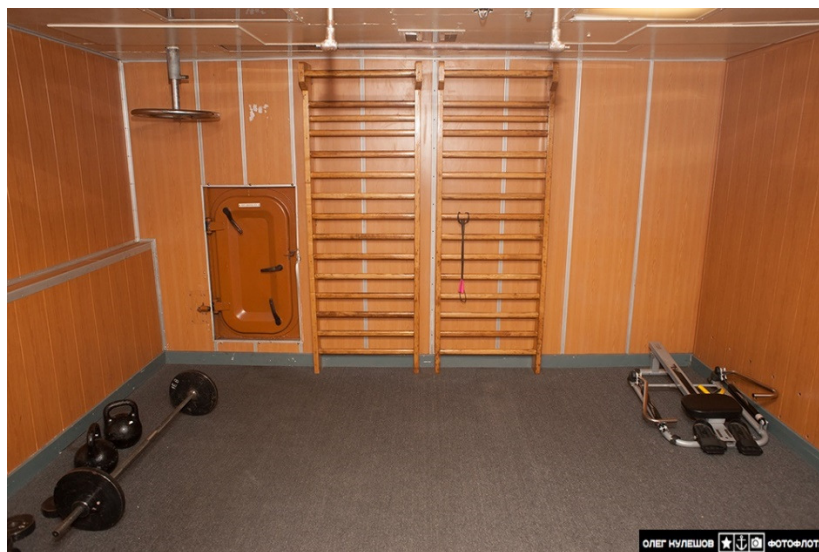
Posada izvan dužnosti organizira razne događaje, poput turnira u šahu. S takvim smještajem i dovoljnom količinom hrane posada fizički i psihički može izdržati ispod površine i do 120 dana.



Slika 33. Sauna[26]



Slika 32. Bazen

**Slika 34. Teretana****Slika 35. Soba za razonodu**

Podmorničari, zbog okolnosti u kojima rade (mali prostori bez dnevnog svjetla i visoka opasnost od smrti) za nagradu dobivaju najfiniju hranu. Po osobi je predviđeno oko 830 grama hrane po danu [27], no ta se količina treba povećati za 25% kako bi se napravile zalihe za slučaj neke havarije. Konačna količina hrane iznosi jedan kilogram po danu po članu posade. Za posadu Typhoon podmornice to iznosi 163 kilograma hrane na dan što za maksimalno trajanje misije od 120 dana iznosi 19.5 tona hrane. Od toga je većina hrane zamrznuta, konzervirana ili je ne kvarljiva suha hrana (žitarice, riža itd.), dok se svježja hrana (voće) upotrebljava na početku misije. U prosjeku se za jedan kilogram hrane može uzeti da zauzima deset litara prostora (0.01 m^3) što za sveukupnu zalihu hrane iznosi 195 m^3 . Pitka voda se proizvodi iz morske vode što znači da je njena potrošnja neograničena. Većina pića se radi od vode (kava,

čaj, sirup sokovi), no treba uračunati i razna druga pića za posadu poput mlijeka ili vina. Potrošnja pića, može se aproksimirati s 1 litrom po osobi po danu što za cijelu misiju iznosi 19560 litara što približno iznosi 19500 tona te zauzima prostor od 195 m³. Potrošnja pitke vode nije uzeta u obzir jer je njena proizvodnja neograničena.

5.1.2. Preduvjeti za život posade

Za normalan život posade u podmornici potrebno je proizvoditi zrak. To je moguće postići postupkom elektrolize vode gdje se upotrebom struje voda može razdijeliti na kisik i vodik. Iz sigurnosnih razloga potrebna su dva takva uređaja u slučaju da jedan zakaže. Pomoću sustava ventilacije u svim habitabilnim dijelovima podmornice održava se 21% kisika u zraku. Također, postavljeni su uređaji i postrojenja za uklanjanje ugljičnog dioksida i vlage iz atmosfere podmornice.

Pitka voda se dobiva isparavanjem morske vode. Proces je jednostavan. Voda se zagrijava te se sakuplja njezina para. Para prolazi kroz kondenzator te dolazi do kondenzacije, tj. ponovo prelazi u kapljevину ali očišćena od morske soli. Voda je u tom stanju upotrebljiva za radne procese različitih uređaja poput hlađenja elektronike ili se može upotrijebiti za rad baterija. Da bi voda bila pitka potrebno ju je dodatno pročistiti od mogućih nečistoća. Kapacitet proizvodnje pitke vode može biti i 150 000 litara na dan što znači da je neograničena, no svejedno je potrebno osigurati tank za skladištenje vode kako u slučaju havarije nekog od uređaja ne bi došlo do njene nestašice. Proces proizvodnje vode nije teško ostvariti budući da se potrebna toplina za njenu proizvodnju može dobiti iz nuklearnog reaktora, a hlađenje za kondenziranje vode se može ostvariti morskom vodom iz okoliša.

Također i temperatura unutar same podmornice je važna za život posade. Ona se održava klimatizacijskim sustavom raspoređenim po svim habitabilnim odjeljcima. Budući da je temperatura okoliša jako niska prostorije se uglavnom griju, dok se prostori gdje ima puno elektronike ili strojeva hlade.

5.1.3. Rješavanje otpada

Otpad se može podijeliti na čvrsti i tekući. Prilikom izbacivanja oba otpada dolazi do mogućnosti detekcije podmornice od strane neprijatelja, stoga se izbacivanje prosječno vrši jednom u 3 dana. Pod tekući otpad spadaju otpadne crne i sive vode od higijene posade. Skupljaju se u specijalnom tanku te se ispumpavaju ili izbacuju pomoću stlačenog zraka. Čvrsti

otpad, posebno ostaci hrane, se pakiraju i onda prešaju. Stavljaju se u posebne metalne posude te se „ispucavaju“ zrakom visokog tlaka [25][28].

Tablica 5. Vrste i masene količine otpada posade po danu [29]

Materijal	g/osobi/po danu	kg/posada/dan
Papir i karton	113	18.42
Plastika	41	6.68
Metal	10	1.63
Staklo	0	0
Ukupno	164	26.73

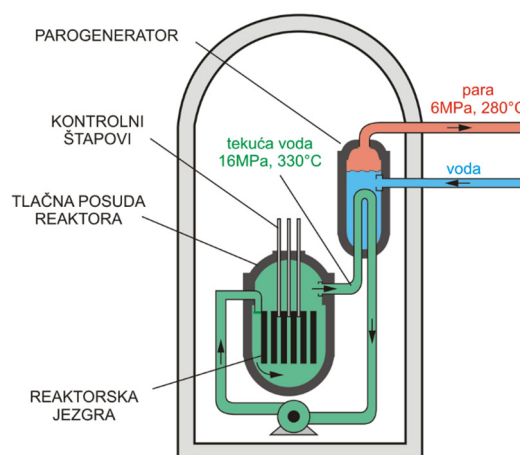
5.2. Oprema za rad podmornice

5.2.1. Nuklearni reaktor

Srcu života Typhoon klase podmornica su dva nuklearna reaktora tipa OK-650 od kojih svaki ima snagu do 190 MW. Pomoću njih se prvo proizvodi para čija se toplina može koristiti u mnoge svrhe poput klimatizacije, stvaranju električne energije te ostvarenje poriva preko parne turbine.

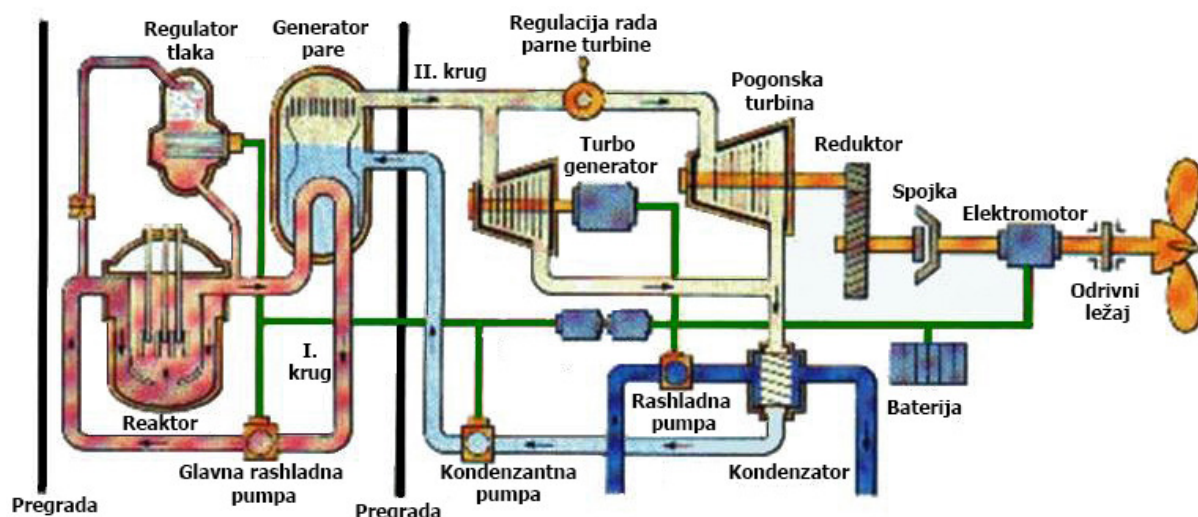
Osnovni dijelovi nuklearnog reaktora su (Slika 36):

1. Jezgra, metalne šipke koje sadrže dovoljno fisibilnog materijala da održe lančanu reakciju na željenom nivou (može biti potrebno i preko 50 t uranija).
2. Izvor neutrona koji će pokrenuti reakciju (kao što je mješavina polonija i berilija)
3. Moderator koji će smanjiti energiju brzih neutrona za učinkovitiju fisiju (materijali kao što su grafit, berilij, teška voda i laka voda)
4. Sredstvo za hlađenje kojim se uklanja fisijom stvorena toplina (obično voda, natrij, helij ili dušik)
5. Sustav kontrole kao što su primjerice šipke bora ili kadmija koji imaju visoki udarni profil (da apsorbiraju neutrone)
6. Adekvatna zaštita, kontrolna oprema i odgovarajuća instrumentacija neophodna za sigurnost osoblja i učinkoviti rad.



Slika 36. Shema nuklearnog reaktora [30]

Cijeli sistem proizvodnje potrebnih oblika energija prikazan je slikom (Slika 37) [31]



Slika 37. Shema proizvodnje potrebnih oblika energije pomoću nuklearnog reaktora [31]

Nakon nastanka u nuklearnom reaktoru visoko zagrijana para prolazi zatvorenim prvim krugom para kroz generator pare. Generator pare se nalazi u drugom odjeljku kako bi se u slučaju kakve nezgode mogao u potpunosti izolirati dio s reaktorom. Iz istog razloga para koja nastaje u reaktoru je fizički odvojena od ostalih elemenata energetskog postrojenja tj. zato je proizvodnja para podijeljena na dva kruga. Prvi krug je „reaktorski“ kroz koji prolazi uvijek ista para/fluid. Taj prvi krug prolazi cijevima kroz generator pare i time se stvara para nezagađena s ozračenim česticama uranija (Slika 37). Para koja nastaje u generatoru pare se dalje koristi za stvaranje potrebnih oblika energije.

Dimenzije i masa samog reaktora nisu pronađene, no pronađeni su podaci o dimenzijama sekcije u kojoj se nalazi nuklearni reaktor Ohio klase. Reaktorska sekcija (sekcija koja sadrži reaktor snage od 220 MW - P_O) Ohio klase, teži 2750 tona (m_{CO}), promjera je 12.8 m a duljine je 16.76 m [32] što čini volumen od 2156 m³ (V_{CO}). Typhoon klasa ima reaktor snage 190 MW (P_T), a dimenzije reaktorske sekcije su promjera 9.2 m te duljine oko 23.8 metra što čini volumen od 1582 m³ (V_{CT}). Cilj je izračunati masu reaktorskog cilindra Typhoon klase (m_{CT}).

Prema metodi opisanoj u poglavlju 4 iz formule (3) dobiveno je debljina oplate iznosi 0.041 m, površina rebra iznosi 0.0183 m² te da razmak rebara cilindra iznosi 0.75 m. S dobivenim veličinama preko izraza (3) može se dobiti masa cilindra s rebrom i duljinom oplate jednog razmaka rebra. Iznos mase tog dijela cilindra je približno 6.28 t. Budući da je duljina cilindra 23.8 m to znači da je cilindar izrađen od 32 rebra čime konstrukcija cilindra teži 201 tonu. ($m_{KT} = 201$ t).

Masa čelika reaktorskog cilindra Ohio klase će se dobiti množenjem mase čelika reaktorskog cilindra Typhoon klase s faktorom koji je dobiven omjerom volumena reaktorskih cilindara Ohio i Typhoon klase te omjerom gustoće titana i gustoće HY-80 čelika (ρ_{HY-80} - čelika od kojeg je izrađena Ohio klasa)

$$m_{KO} = m_{KT} \cdot \frac{V_{CO}}{V_{CT}} \cdot \frac{\rho_{HY-80}}{\rho_t} = 553 \text{ t} \quad (37)$$

Konačna masa čelika reaktorskog cilindra Ohio klase iznosi 553 t. Oduzimanjem od sveukupne mase reaktorskog cilindra s masom čelika cilindra dobiva se masa nuklearnog reaktora s popratnom opremom.

$$m_{RO} = m_{COK} - m_{KO} = 2750 - 553 = 2197 \text{ t} \quad (38)$$

Masa reaktora i njegove opreme Typhoona dobiti će se množenjem mase nuklearnog reaktora i njegove opreme Ohio klase s omjerom snaga reaktora Typhoon klase i Ohio klase.

$$m_{RT} = m_{RO} \cdot \frac{P_T}{P_O} = 1897 \text{ t} \quad (39)$$

Konačna masa Typhoon reaktora i njegove opreme iznosi 1897 t. Njezinim zbrajanjem s masom konstrukcije cilindra dobiva se sveukupna masa reaktorskog cilindra Typhoona.

$$m_{CT} = 1897 + 201 = 2098 \text{ t} \quad (40)$$

5.2.2. Parno-turbinsko postrojenje i pogon

Para koja je nastala generatoru pare (drugom krugu) dovodi se u parnu turbinu (VV tip) (Slika 37) koja prolaskom pare kroz nju ostvaruje maksimalnu snagu od 37 MW.

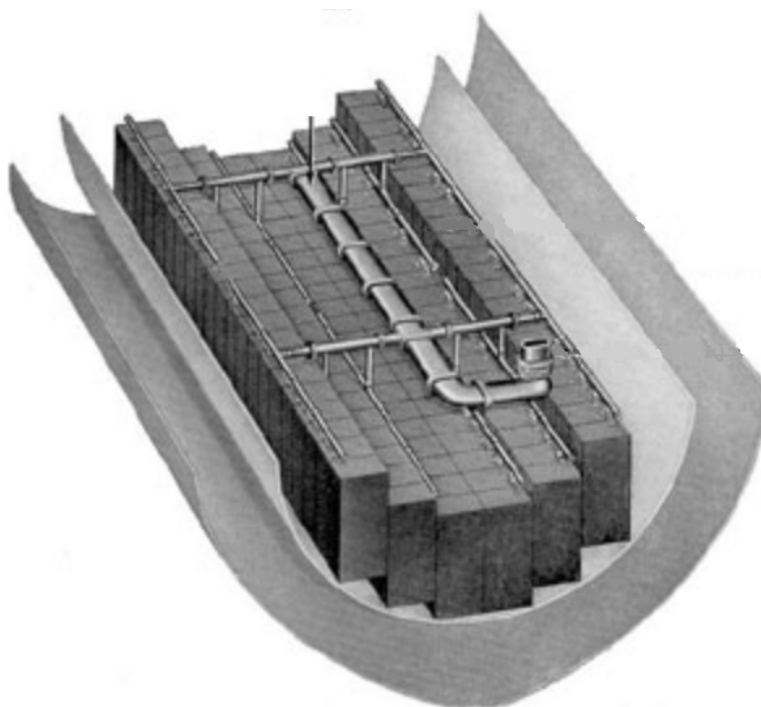
Ta snaga se preko reduktora, vratila, niza ležajeva i na kraju preko odzivnog ležaja prenosi na vijak. Vijak je sedmerokrili promjera 5.55 metara. Na pramcu i krmi lakog trupa postavljena su dva porivnika snage 750kW. Na pogonsko vratilo preko spojke spojen je pomoćni generator električne energije snage 200 kW. Pored svakog generatora pare nalaze se po još dvije plinske turbine svake snage 3200 kW koje pokreću generatore električne energije. Masa opreme tog dijela strojarne (bez nuklearnog reaktora) podmornice se može dobiti množenjem snage sveukupne snage parnih turbina s 60 kg/kW [33], no taj faktor je uobičajen u civilnoj brodogradnji. U specijalnim namjenama, poput podmornica i u situacijama kada nema novčanog limita mogu se koristiti kvalitetnije izrade te lakši i skuplji materijali, stoga će se faktor od 60 kg/kW umanjiti za 25%, tj. konačni faktor iznosi 45 kg/kW. U tu masu je uračunata

sva oprema parno-turbinske strojarnice (vratilo, reduktori, generator pare itd.) osim mase baterija i pomoćnih dizel motora koji će biti opisani u nastavku. Končano, snaga jedne parno-turbinske strojarnice je 43400 kW što množenjem s definiranim faktorom od 45 kg/kW daje masu jedne strojarnice od 1953 t.

5.2.3. Dizel motori i baterije

U svakoj strojarnici nalazi se jedan pomoćni dizel motor snage 800 kW koji je spojkom spojen na pogonsko vratilo. Njegova masa iznosi oko 13 tona [35]. Također, treba uračunati i masu tanka goriva za dizel motore koji je opisan u poglavlju 6.3.3.

Obično podmornice imaju dva „bunara“ baterija i budući da je na Typhoon klasi sve u tandemu može se pretpostaviti da su i baterije također zbog čega se pretpostavlja da na Typhoon klasi postoje četiri bunara baterija. Budući da ne postoje podaci o baterijama na Typhoon klasi kao mjerodavne podatke uzeti će se podaci o baterijama pronađenim za Ohio klasu podmornica. Jedan bunar baterija u Ohio klasi se sastoji od 126 ćelija, svaka je mase 950 kg te dimenzija 0.3×0.3×1.5 metara. Jedno baterijsko skladište time teži 120 tona. Baterije ne moraju biti u strojarnici budući da je ona već prepuna pogonskom opremom. Radi bolje raspodjele mase pretpostavlja se da su smještene u raketnom dijelu habitabilnog prostora. Baterije se postavljaju kako je prikazano na slijedećoj slici (Slika 38).

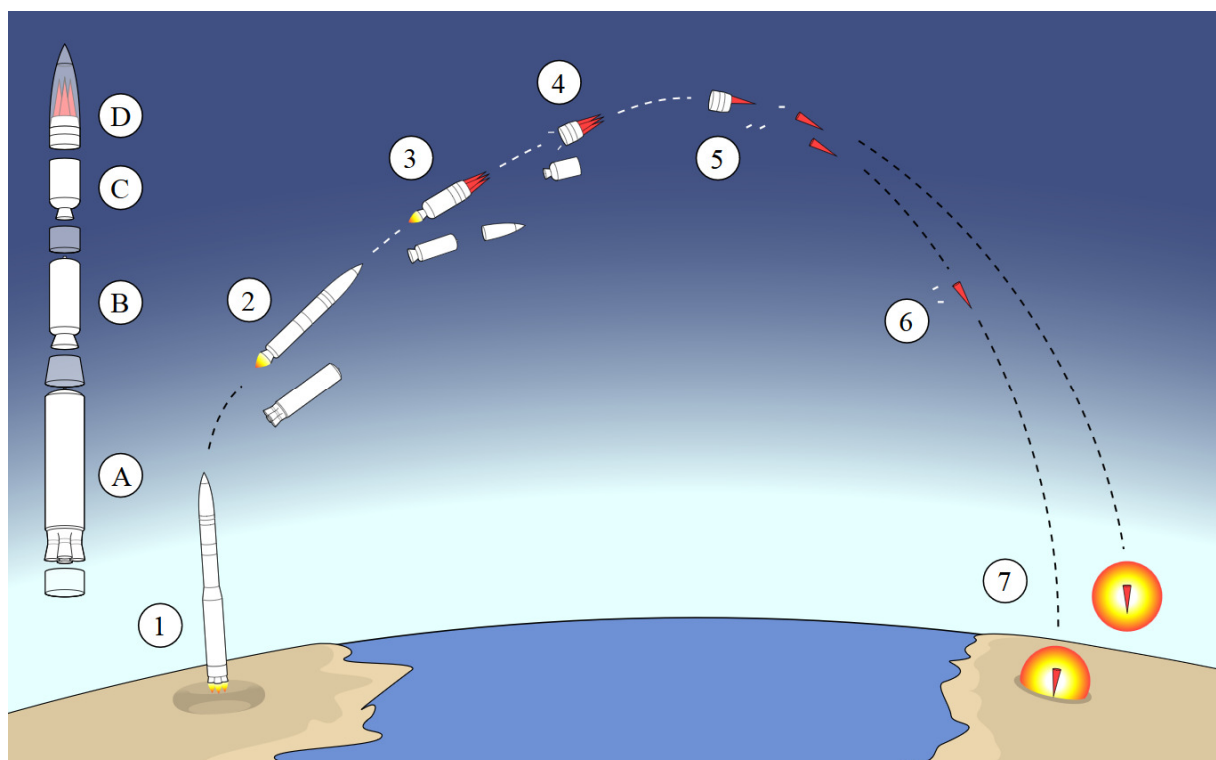


Slika 38. Prikaz smještaja baterija unutar trupa podmornice [34]

5.3. Naoružanje i ostala vojna oprema

5.3.1. Balističke rakete

Kao što je već opisano, Typhoon klasa je opremljena R-39 nuklearno naoružanim balističkim raketama s 10 bojevih glava – M.I.R.V. (engl. Multiple independently targetable reentry vehicle – hrv. bojeva glava s višestrukim neovisnim povratnim modulima) (Slika 39)[36]. Njihov promjer je 2.4 m, visina im je 16 metara, a masa im je 87.6 tona. Domet im je 8400 km. Budući da je udaljenost između Sjevernog pola i Ekvatora oko 10 000 km to znači da Typhoon klasa podmornica ima mogućnost gađati skoro bilo koji cilj na sjevernoj polutki. Rakete mogu biti ispaljene s dubine i do 40 metara. Silos, u kojem se nalazi raketa, ispunjen je zrakom, a ne morem. Između poklopca silosa i rakete nalazi se još jedan „lomljivi poklopac“. U slučaju potrebe za ispaljenjem raketa ispod morske površine, poklopac silosa se otvara no „lomljivi poklopac“ je dovoljno čvrst da ne dopusti vodi da uđe u silos. Zatim se u silos ispod rakete ubacuje visoko stlačeni zrak. Njegova sila je toliko velika da izbacuje raketu iz silosa, raketa razbija lomljivi poklopac te nakon toga još uvijek ima dovoljnu inercijsku silu da prođe kroz 40 metara vode iznad sebe. Dolazeći na vodenu površinu, pali se raketni pogon i raketa polijeće. Poslije polijetanja raketa ima 3 gorive ćelije koje izgaraju u određenim intervalima.



Slika 39. Shematski prikaz ispaljenja M.I.R.V.-a [36]

Opis crteža (Slika 39):

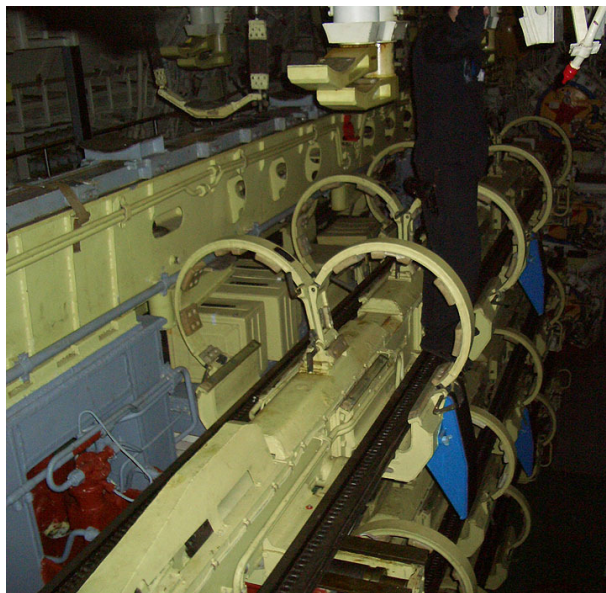
U prvoj (1) fazi zapaljuje se prva goriva ćelija te raketa polijeće. U drugoj (2) fazi, otprilike 60 sekundi nakon polijetanja, izgara prva goriva ćelija (A) i ona se odbacuje. Potom se pali druga goriva ćelija (B) koja u trećoj fazi, otprilike 120 sekundi nakon polijetanja, izgara te se odbacuje nakon čega se pali treća goriva ćelija (C). Odbacuje se i poklopac spremnika bojevih glava (D). U četvrtoj fazi, otprilike 180 sekundi nakon polijetanja u potpunosti izgara treća goriva ćelija te se spremnik bojevih glava odvaja od njega (D). U toj fazi spremnik bojevih glava se nalazi na rubu Zemljine atmosfere. U 5. fazi bojeve glave se odvajaju od spremnika te se usmjeravaju prema svojim ciljevima. U 6. fazi odbacuju se mamci, no oni se također mogu odbaciti i u 5. fazi. U 7. fazi bojeve glave udaraju na cilj, moguće je da detoniraju udarom u kopno ili u zraku, na određenoj visini od tla. Vrijeme od ispaljenja do udara u metu je oko 20 minuta [6].

Razorna moć svake bojeve glave je 100kT. Za usporedbu, atomske bombe bačene na Hiroshimu i Nagasaki imale su razornu moć oko 20kT (to je energija koju bi proizvela eksplozija 20 000 tona TNT-a). Rakete su smještene u raketnim silosima između glavnih trupova u pramčanom djelu.

5.3.2. Torpeda

U torpednom prostoru nalazi se 6 lansera torpeda. Četiri su promjera 533 mm, a dva su promjera 650 mm [11] [18]. Lanseri se automatski pune, a ne ručno. Podmornica sa sobom nosi 22 torpeda. Torpedni lanseri se mogu koristiti i za polaganje mina i lansiranje balističkih raketa.

Vrste torpeda koji su se mogli lansirati preko torpednih lansera promjera 533 mm su: 53-65K, SET-65, SAET-60M, USET-80 i VA-111, dok se s lansera promjera 650 mm mogu lansirati modeli torpeda 65-76 te balističke raketa SS-N-15 i SS-N-16 [38] [39]. Značajke navedenih vrsta torpeda navedene su u nastavku.



Slika 40. Sustav za automatsko punjenje torpeda ugrađen na Typhoon klasi [37]

53-65K:

Projektirana su za potapanje površinskih brodova. Mogu biti ispaljena s podmornica ili brodova. Torpeda su termalno pogonjena (pogone se izgaranjem kerozina i kisika). Navođene su aktivnim akustičnim sonarom pomoću kojeg mogu pratiti svoje mete. Torpeda su duga 7.2 metra i teže oko 2.1 tonu. Kreću se brzinom oko 45 čv, dometa su do 19 kilometara, a mogu se ispaliti s 14 metara dubine.

SET-65:

Dizajnirana su za antipodmorničko ratovanje, mogu se ispaliti s podmornica ili s površinskih brodova. Pogonjena su baterijom, kreću se brzinom oko 40 čv, domet im je 16 kilometara te se mogu ispaliti s dubine od 400 metara. Duga su 7.8 metara te imaju masu od 1750 kg. Navođena su aktivnim akustičnim sonarom pomoću kojeg može pratiti metu u krugu od 800 metara.

SAET-60M:

Opremljena su pasivnim akustičnim sonarom, dizajnirana su isključivo za upotrebu na podmornicama za borbu protiv površinskih brodova. Pogonjena su baterijom te imaju mogućnost kretanja u dvije brzine, brzinom od 42 čvora dometa 13 km te brzinom od 35 čv dometa 15 km. Mogu se ispaliti s dubine od 40 metara. Duljine su 7.8 metara, a mase 1750 kg.

USET-80:

Višenamjenska torpeda navođena s akustičnim te aktivnim/pasivnim sonarom. Moguće ih je lansirati s brodova ili podmornica, a meta im može biti podmornica ili površinski brod. Duljine su 7.9 m, mase su 2 tone. Pogonjene su baterijom, kreću se brzinom i do 48 čv, a dometa su 20 km. Mogu se ispaliti s dubine od 400 m.

VA-111:

Super kavitirajuća torpeda koja se kreću brzinom i do 200 čv. Pogonjena su čvrstim gorivom. Vrh im je tako dizajniran da potiče kavitaciju. Zbog velike brzine dolazi do kavitacije na vrhu torpeda čime se stvara mjehur zraka. Zbog njegovog nastanka smanjuje se otpor torpeda, njegova se brzina povećava čime se povećava i područje kavitacije. Uskoro se cijelo torpedo nađe u mjehuru zraka pri čemu ono dostiže svoju najveću brzinu. Torpeda su projektirana za korištenje u slučaju kada je podmornica otkrivena od strane neprijateljske podmornice. Mogu se koristiti protiv neprijateljske podmornice, ali i protiv neprijateljskih torpeda. Zbog superkavitacije nema mogućnost navođenja stoga su namijenjena za borbe na kraćim

udaljenostima zbog čega su prve verzije imale radijus kretanja do 7 km. Duljine su 8.2 m, a masu im iznosi 2.7 t. Mogu se ispaliti na 100 metara dubine.

65-76:

Nadimak im je „kit“ i projektirana su isključivo za upotrebu na podmornicama za borbu protiv površinskih brodova. Duljine su 11 metara, a masa im je veća od 4 tone. Pogonjena su plinskom turbinom koja je pokretana izgaranjem mješavine kerozina i hidrogena ili peroksida. Ima dvije brzine kretanja, 50 čv pri kojoj ima domet od 50 km i 30 čv gdje ima domet 100 km. Može se ispaliti s dubine od 100 metara nakon čega se torpedo diže na dubinu od 14 metara od kuda se navodi akustičnim sonarom prema meti. Pretpostavlja se da je eksplozija spremnika goriva jednog takvog torpeda uzrokovala uništenje podmornice „Kursk“.

SS-N-15 – Starfish

To je balistička raketa koja se može lansirati preko torpednog sustava podmornice. Može se lansirati s dubine do 60 m, a nakon izbijanja na površinu ima domet leta do 40 km. Duljine je 11.3 m, a mase 2.2 tone.

SS-N-16 – Stallion

To je također balistička raketa koja se može lansirati preko torpednih cijevi podmornice. Način rada joj je identičan kao i od SS-N-15. SS-N-16 je namijenjen u borbi protiv površinskih brodova ili podmornica ovisno kojom je bojevom glavom opremljen. Može biti opremljen nuklearnom bojevom glavom udarne snage do 20kT. Domet djelovanja je oko 40 km, duljine je 8.2 , mase je 2.5 t.

5.3.3. Sredstva detekcije, navigacije i komunikacije

Hidroakustička oprema:

Hidroakustičku opremu čini sustav MGK-540 "Skat-3" koji se sastoji od sonara SJC MGK-500 "Skat-KS" (u nekim izvorima se navodi kao „slope“), koji se sastoji od 4 antene koje mogu istovremeno pratiti i do 12 meta. Opremljen je i sonarom MG-519 "Harp-M" koji služi detekciji mina.

Radar:

MRKP-58 „Radian“

Navigacija:

Satelitska navigacija „Symphony“

Komunikacijska oprema:

Radio sustav „Lighting-L1“ sa satelitskim komunikacijskim sistemom „Tsunami“. Sustav ima mogućnost puštanja dviju bova „Hall“ na morsku površinu pomoću kojih može primiti radio poruke s pozicijama neprijatelja, primiti satelitske navigacijske podatke itd. Sustav radi ispod leda i na dubini do 150 metara.

Ostala oprema:

Komandi habitabilni prostor opremljen je s 2 periskopa, „Signal 3“ i „Swan 21“. Jedan je namijenjen za kapetana a drugi je namijenjen posadi za upotrebu. U komandom prostoru je smješten sustav za obradu radarskih i sonarskih oznaka „prijatelja i neprijatelja“.

5.3.4. Sredstva skrivanja

Već je rečeno da je Typhoon klasa namijenjena za plovidbu morima na Sjevernom polu i njegovoj blizini. Razlog tome je što ga ispod leda ne može pratiti niti jedan satelit, brod ili zrakoplov. Jedino ju mogu pratiti druge podmornice ali i ta mogućnost je smanjena na minimum zato jer se led konstantno miče, puca i topi što prikriva zvuk Typhoon podmornice. Također, malo podmornica je projektirano za plovidbu tako hladnim morem. Upravo zbog toga Typhoon ne može ploviti toplijim morima. Hlađenje reaktora prilagođeno je hladnijim morima, stoga plovidbom u toplijim morima rad reaktora može postati upitan.

Osim što je Typhoon skoro nemoguće pratiti ispod bučnog leda ona je također sama po sebi jako tiha. Prilikom porinuća prvog Typhoona ona je bila najtiša sovjetska podmornica. Njezina vanjska oplata u potpunosti je prekrivena crnim hidroakustičkim slojem gume koji zvučno izolira zvukove unutar lakog trupa (Slika 41), a crna boja smanjuje njezinu vidljivost na manjim dubinama.



Slika 41. Sloj hidroakustičke gume lakog trupa na otvorenoj palubi [40]

Zvuk koji neprijateljska podmornica može najlakše detektirati je zvuk rada vijaka. Svi podmornički vijci su napravljeni od sedam listova te su izduženi kako bi im se povećala površina (Slika 42). To je napravljeno zato da se može smanjiti brzina vrtnje vijaka kako ne bi došlo do kavitacije koja je bučna i može odati položaj podmornice.



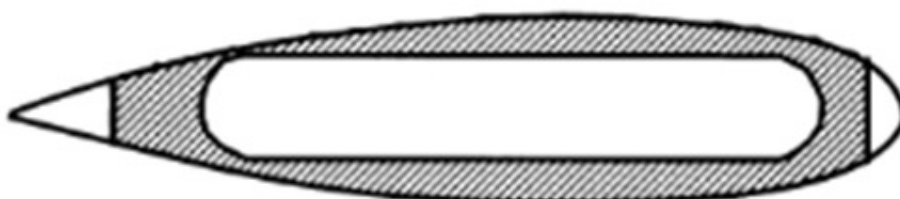
Slika 42. Vijci Typhoon klase [41]

No, i sama konstrukcija Typhoona ima ulogu u bučnosti podmornice. Izvedba zatvorenog čvrstog trupa Typhoona (Slika 43, prikaz b), tj. trupa u kojem je čvrsti trup u potpunosti odvojen od lakog trupa čini ju još tišom jer se vibracije koje nastaju u čvrstom trupu ne prenose direktno na okolni fluid nego se prvo prenose na konstrukciju lakog trupa čime se njihova jakost smanjuje (Slika 43).

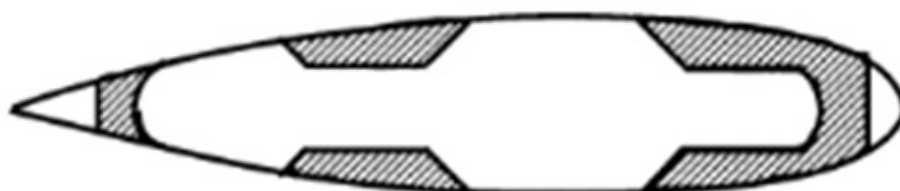
Typhoon proizvodi toliko drugačije zvukove da ga je jednom prilikom pratila ženka kita [25].



(a) Izloženi čvrsti trup oblikovan formom



(b) Zatvoreni čvrsti trup



(c) "Strukirani" čvrsti trup dijelomično izložen



(d) Izloženi čvrsti trup reduciran pri krajevima

Slika 43. Vrste izvedbi čvrstih trupova [42]

6. STABILITET U OŠTEĆENOM STANJU

6.1. Općenito o stabilitetu podmornice

Pored proračuna čvrstoće jedan od najzahtjevnijih zadataka, prilikom projektiranja podmornice, je proračun stabiliteta podmornice. Stabilitet podmornice je zahtjevan jer je za njegov proračun potreban dobro optimiran položaj centra mase i centra mase istisnine podmornice. Veće podmornice koriste se u vojne svrhe što znači da nose teško naoružanje i ostalu vojnu opremu, koje k tome moraju imati dovoljno prostora u kojem će se moći smjestiti i omogućiti normalan život posade. Sve to treba ostvariti s ciljem da se minimizira sveukupna veličina same podmornice. Iz pogleda čvrstoće poželjno je da prostori budu što manji kako bi se dobila čvršća struktura, no da bi se podmornicom moglo upravljati potrebno je osigurati dovoljno velike prostore za normalan život posade i smještaj potrebne opreme. Za navedene zahtjeve potrebno je pronaći kompromis.

Već u samim počecima projektiranja podmornice mora se voditi računa o stabilitetu tako da se vodi računa o položaju težišta mase i položaju težišta mase istisnine podmornice. No, također prilikom projektiranja treba predvidjeti i razne slučajeve u kojima se međusobni položaj mase i mase istisnine podmornice mijenja. Kako bi se riješio taj problem mora se tijekom projektiranja predvidjeti nekoliko vrsta balastnih tankova.

Masa velikih podmornica, među kojima je i Typhoon klasa, zbog smještaja teškog naoružanja i opreme može biti tako velika da istisnina čvrstog trupa nije dovoljno velika da bi podržala samu podmornicu, zbog čega se moraju izvesti balastni tankovi koji su uvijek ispunjeni zrakom kako bi se postigao potrebni iznos uzgona. Potrebni su i balastni tankovi koji će se puniti i prazniti balastom kako bi podmornica mogla postizati određene dubine i trimove. Također, kod konvencionalnih podmornica potrebno je smjestiti tankove s pitkom vodom i gorivom, te je potrebno postaviti balastne tankove koji će se puniti balastom tempom pražnjenja tankova vode i goriva. Za vojne podmornice treba izvesti i balastne tankove rezervne istisnine. Ti balastni tankovi su cijelo vrijeme puni morem, a u slučaju oštećenja se prazne te nadoknađuju izgubljeni istisninu.

Navedeni balastni tankovi se mogu postaviti unutar čvrstog trupa, no time se troši koristan prostor pa su zato najčešće smješteni između čvrstog i lakog trupa. Budući da njihova unutrašnjost njih namijenjena smještaju posade, mogu se konstruirati dovoljno malima kako bi se postigla dovoljna čvrstoća njihove strukture za plovību na većim dubinama. Prilikom

smještaja balastnih tankova također treba voditi računa kako bi se njihovom izvedbom i smještajem ispunili uvjeti plovnosti podmornice na morskoj površini i ispod nje.

Iz navedenog se zaključuje da upravljanje podmornicom zahtjeva konstantno praćenje podataka o morskoj dubini i trimu podmornice koji se konstantno za vrijeme podvodne plovidbe mijenjaju. Analogno s time potrebno je puniti i prazniti balastne tankove za što posada mora biti dobro izvježbana. No, da bi se podmornici omogućila dobra operativnost, u fazi njezinog projektiranja i njene izgradnje potrebno je vrhunsko znanje i velika količina rada. Ovo poglavlje se bavi rješavanjem problema stabiliteta Typhoon klase podmornica u neoštećenom i oštećenom stanju. Budući da podaci o stabilitetu i rasporedu balastnih tankova nisu poznati jer je to vojna tajna, logičkim zaključivanjem i dosadašnjim saznanjima pokušat će se razjasniti barem dio tog problema.

6.2. Fizikalni problemi stabiliteta podmornice

6.2.1. Uzgon

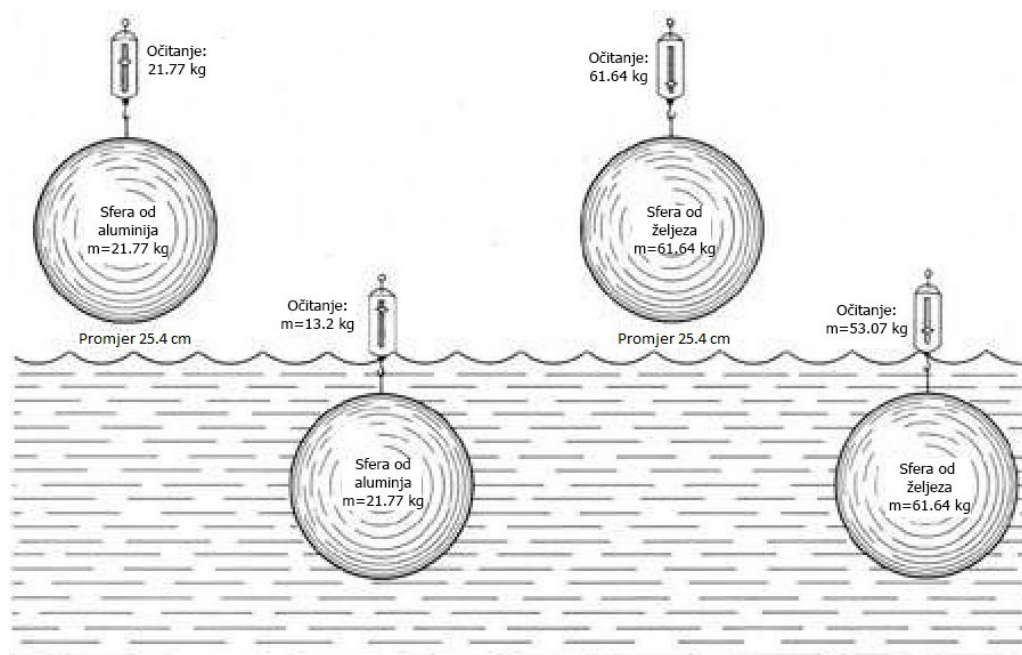
Na sva tijela koja su u dodiru s fluidom djeluje sila uzgona. Definicija uzgona je opće prihvaćena kao sila koja omogućuje da tijelo pluta, no to nije sasvim ispravna definicija. Uzgon je sila koja djeluje na tijelo koje je uronjeno u fluidu ili pluta na njegovoj površini prilikom čega je smjer njegovog djelovanja suprotan od smjera gravitacije. Iznos sile uzgona jednak je masi fluida istisnutog tijelom.

Iz definicije se primjećuje da uzgon u potpunosti ovisi o gustoći fluida i o veličini volumena tijela. O veličini uzgona i masi tijela ovisi da li će tijelo plutati ili tonuti. Budući da se u ovom radu razmatra podmornica (koja plove u moru) to znači da se vrsta fluida ne može promijeniti, no može se promijeniti masa, oblik i veličina volumena podmornice.

Masa, oblik i veličina volumena podmornice se mijenjaju balastiranjem podmornice. Tu se proračunski javljaju dvije mogućnosti: ukrcani balast, tj. prodrla voda se može smatrati masom koja je ukrcana na podmornicu, tj. dodatnom masom ili se prostor, balastni tank koji se ispuni morem u kojem plove podmornica, može smatrati izgubljenom istisninom budući da time taj prostor više ne sudjeluje u uzgonu. Taj problem je objašnjen u poglavlju 6.2.4.

Tvrđnju da veličina uzgona ovisi o volumenu tijela može se potkrijepiti slijedećim primjerom (Slika 44). Uzmemo dvije sfere, jedna izrađena od aluminija a druga od željeza, obje promjera

25.4 cm, tj. istog volumena. Sfera od aluminija teži 21.77 kg, dok sfera od željeza teži 61.64 kg.



Slika 44. Pokus s uzgonom [46]

Objekte sfere objese na svoju viseću vagu. Svaka vaga pokazuje odgovarajuću masu svake sfere. Sfere se urone u isti fluid i potom se očitavaju vrijednosti na vagama. Vaga na sferi od aluminija pokazuje 13.2, kg dok vaga na sferi od željeza pokazuje 53.07 kg. Razlika između očitavanja za vagu na aluminijskoj sferi je $21.77 - 13.2 = 8.57$ kg, dok razlika očitavanja na vagi na željeznoj sferi iznosi $61.64 - 53.07 = 8.57$ kg. Na obje vage razlika u očitanjima masa je ista kao što je isti i volumen uronjenih sfera što dokazuje da veličina uzgona ovisi o volumenu uronjenog tijela [46].

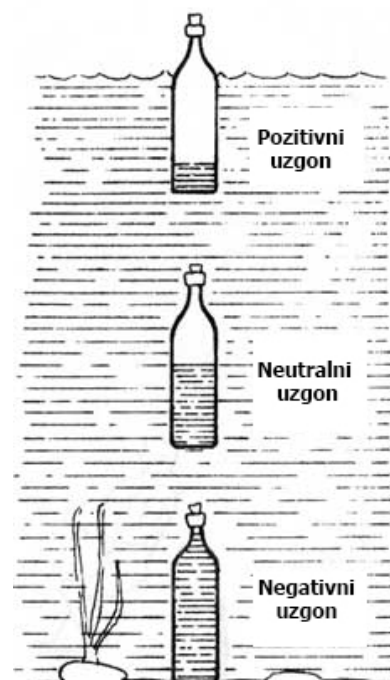
6.2.1.1. Vrste uzgona

Ovisno o gustoći tijela postoje tri vrste uzgona koje djeluju na to isto tijelo (Slika 45):

1. Pozitivni uzgon – ako tijelo ima manju gustoću od fluida u kojem se nalazi ono pluta. Na crtežu je prikazana boca koja ima neku masu i zatvoreni nepropusni volumen. Dio tog volumena je ispunjen fluidom koji također ima neku masu, no veći dio boce je prazan. Kada se podijeli zbroj mase boce i fluida unutar nje sa sveukupnim volumenom boce (volumen ispunjenog i neispunjenog dijela) dobije se srednja gustoća boce koja je manja od fluida u kojem pluta.

2. Neutralni uzgon – tijelo koje ima jednaku gustoću kao i fluid u kojem se nalazi lebdi u njemu. Prema crtežu to znači da je srednja gustoća tijela jednaka gustoći okolnog fluida.
3. Negativni uzgon – tijelo ima veću gustoću od gustoće fluida u kojem se nalazi te tijelo tone (može se reći da je srednja gustoća tijela veća od gustoće okolnog fluida).

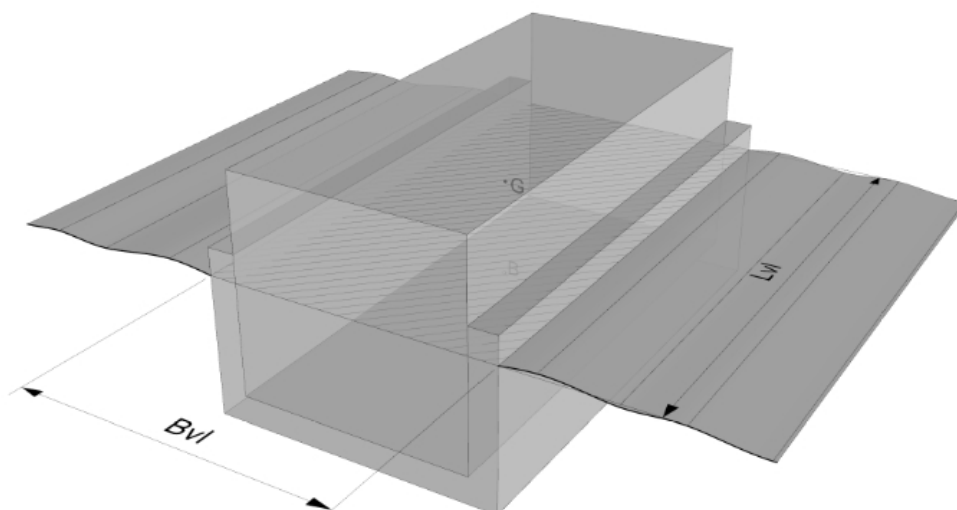
Prema navedenim i objašnjenim vrstama uzgona primjećuje se da se vrsta uzgona koja djeluje na tijelo u fluidu može regulirati dodavanjem ili oduzimanjem mase tijelu ili povećanjem i smanjenjem volumena tijela kako bi se regulirala srednja gustoća tijela, čime se direktno utječe na uzgon. O ta dva principa reguliranja srednje gustoće koja daju isti rezultat detaljno se bavi poglavlje 6.2.4.



Slika 45. Vrste uzgona [43]

6.2.2. Usporedba stabiliteta površinskih i podvodnih brodova

Tijelo koje pluta na površini nekog fluida ima dio koji se nalazi ispod površine tog fluida i dio koji se nalazi iznad površine tog fluida. To tijelo ima svoju masu (u daljnjem tekstu će se označavati s D). Volumen dijela tijela koji se nalazi ispod površine (oznaka: ∇) (Slika 46) istisće fluid u kojem se nalazi, jer fizikalno nije moguće da se dva tijela nalaze na istom mjestu u prostoru. Kada se taj istisnuti volumen pomnoži s gustoćom fluida dobiva se veličina koja se naziva masa istisnine koja je jednaka masi tijela koja pluta na površini fluida i ona uzrokuje uzgon (u daljnjem tekstu uzgon će se označavati s U). Tu se dobiva 1. zakon plovnosti koji glasi: masa broda jednaka je masi istisnute vode. Brod ima svoju masu čije je težište označeno s G (Slika 46). Podvodni volumen tijela također ima svoje težište koje je označeno s B . Ako se masa D s težištem u G poveća, brod uranja toliko koliko je dovoljno da se umnožak novo uronjenog dijela volumena s gustoćom fluida (rezultat umnoška je masa istisnine U) poveća toliko da se izjednači s iznosom uvećane mase broda.



Slika 46. Brod na površini vode

Stabilitet na vodenoj površini uvelike ovisi o položaju metacentra, tj. njegovog radijusa. Metacentarski radijus plovila se računa prema sljedećoj formuli:

$$\overline{MB}[m] = \frac{I[m^4]}{\nabla[m^3]} \quad (41)$$

Gdje su:

∇ – volumen podvodnog dijela forme broda

I – moment tromosti vodne linije koji se može promatrati s obzirom na uzdužnu i na poprečnu os vodne linije. Gledajući s obzirom na uzdužnu os I se definira preko sljedećeg odnosa:

$$I = \frac{L_{VL} \cdot B_{VL}^3}{12} \quad (42)$$

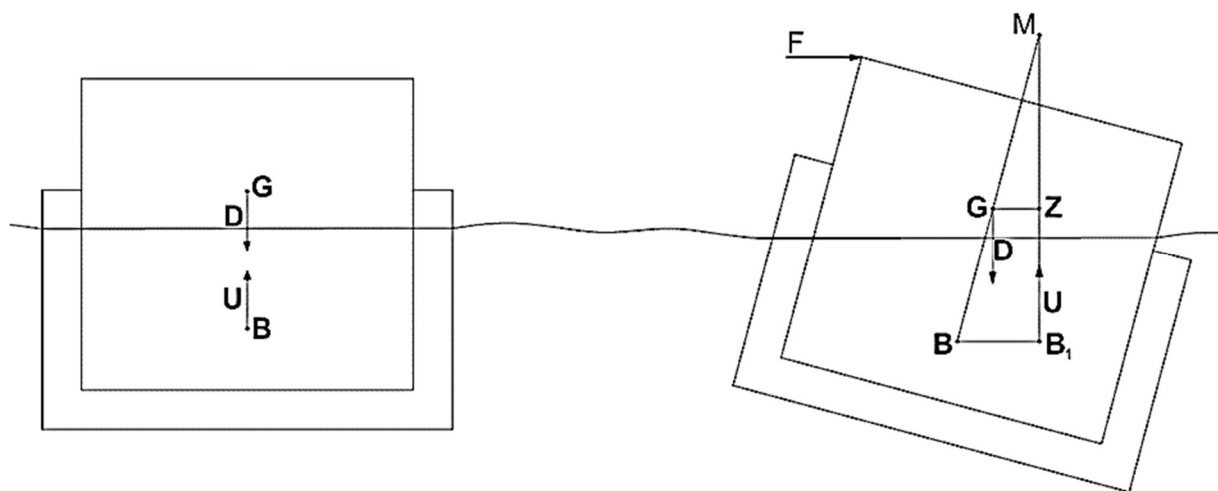
Gledajući s obzirom na poprečnu os vodne linije I se računa:

$$I = \frac{L_{VL}^3 \cdot B_{VL}}{12} \quad (43)$$

U obje jednadžbe L_{VL} (Slika 46) predstavlja duljinu vodne linije, a B_{VL} širinu vodne linije (njihovim umnoškom se dobije površina vodne linije – šrafirana na slici). Računajući s momentom tromosti oko poprečne osi dobiva se radijus uzdužnog metacentra, dok se s računanjem oko uzdužne osi dobiva radijus poprečnog metacentra.

Također izraze (42) i (43) treba pomnožiti s faktorima vodnih linija f_1 i f_2 u slučaju kada se radi proračun za pravi brod, a ne za ponton kao što je u ovom primjeru. Naime faktori vodnih linija su uvijek manji od 1 i predstavljaju omjer stvarne površine vodne linije i umnoška dobivenog množenjem L_{VL} -a i B_{VL} -a.

Dakle, iz navedenog, na brod u ravnotežnom stanju djeluje masa istisnine (U) iz B koja je jednaka njegovoj masi (D) i djeluje iz G , te se dvije sile međusobno poništavaju čime se sustav uravnotežuje. Potrebno je napomenuti da po 2. uvjetu plovnosti spojnica \overline{BG} je uvijek okomita na vodnu liniju.



Slika 47. Stabilitet broda na površini

Ako na bok broda djeluje sila F (npr. vjetar) brod će se nagnuti za neki kut, nagib (φ), (Slika 47) zbog čega se mijenja oblik volumena podvodnog dijela forme što uzrokuje pomak težišta volumena istisnine (ono će preći iz B u B_1) iz kojeg djeluje uzgon. Točka u kojoj se sijeku produljena spojnica \overline{GB} iz početnog položaja i sila uzgona iz novog položaja (B_1) naziva se metacentrom (M). Također ovaj sustav je u ravnoteži. Sila F djeluje oko točke G i time stvara neki moment dok uzgon iz B_1 također stvara moment oko točke G . U ravnotežnom stanju ta dva momenta su iznosom jednaki. Krak momenta kojeg stvara uzgon je spojnica \overline{GZ} . Ona se naziva polugom statičkog stabiliteta. Tu se formulira 3. uvjet plovnosti po kojem, da bi brod bio stabilan na površini, metacentar uvijek mora biti iznad težišta sistema G .

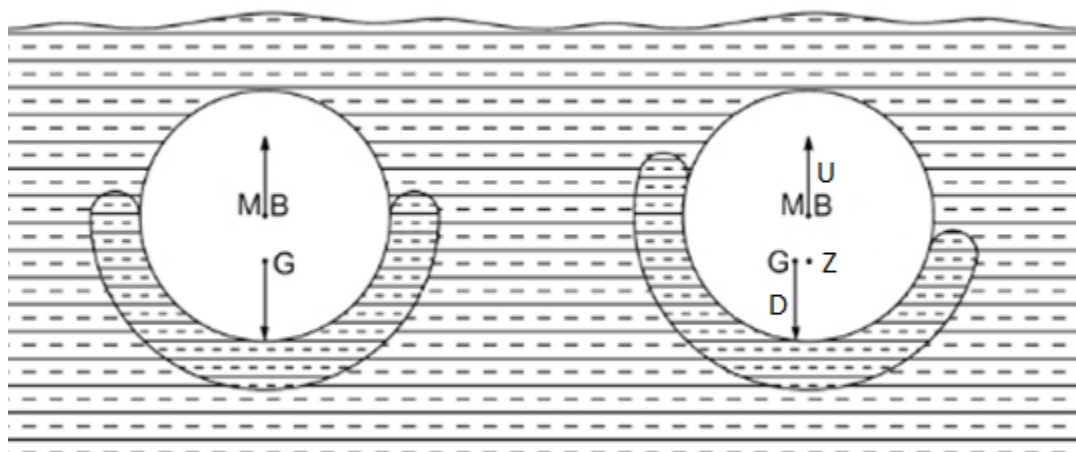
Moglo bi se reći da je metacentar točka oko koje se rotira sila uzgona uslijed nagibanja broda gdje metacentarski radijus predstavlja udaljenost između metacentra i položaja težišta istisnine. Ta tvrdnja vrijedi samo kod manjih nagiba broda, kod većih nagiba broda položaj metacentra se mijenja. Iz navedenog se zaključuje kako stabilitet površinskih brodova ponajviše ovisi o obliku podvodnog dijela forme, dakle svaka forma broda ima svoj karakteristični stabilitet pa se tu govori o stabilitetu forme.

Kod podmornica, da bi bile stabilne ispod površine, težište istisnine (B) (Slika 48) mora biti iznad težišta mase sistema (G). No, nagibanjem podmornice ne mijenja se oblik uronjenog

volumena zbog čega se ne mijenja ni težište istisnine, a ni težište mase. Težište istisnine mora biti iznad težišta mase sistema jer ako se podmornica iz nekog razloga nagne uzgon će oko težišta sistema G stvarati moment koji će ispravljati podmornicu, jer bi se u protivnom podmornica prevrnula. Moment uzgona koji se stvara uslijed nagiba podmornice jednak je umnošku kraka \overline{GZ} i mase istisnine U . Kako je rečeno, položaj metacentra prema izrazu (41) ovisi o vodnoj liniji, no kod zaronjenih tijela nema vodne linije. Zbog toga ne postoji moment tromosti vodne linije zbog čega metacentarski radijus iznosi 0, tj. metacentar se nalazi u težištu istisnine. Očito je da oblik forme ne utječe na stabilitet već postoji samo stabilitet težina, tj. mora se ispuniti uvjet da težište istisnine B uvijek bude iznad težišta mase G kako se podmornica ne bi prevrnula. Drugim riječima visinska razlika između vertikalnog položaja težišta istisnine B (engl. vertical center of bouyancy, u daljnjem tekstu koristit će se skraćenica VCB) i vertikalnog položaja težište mase podmornice (engl. vertical center of gravity, u daljnjem tekstu koristit će se skraćenica VCG) uvijek mora biti pozitivna. Zbog nepostojanja stabiliteta forme, izraz za polugu statičkog stabiliteta je uvijek isti (formula je izvedena u poglavlju 6.2.4):

$$M_{st} = D \cdot \overline{GB} \cdot \sin\varphi \quad (44)$$

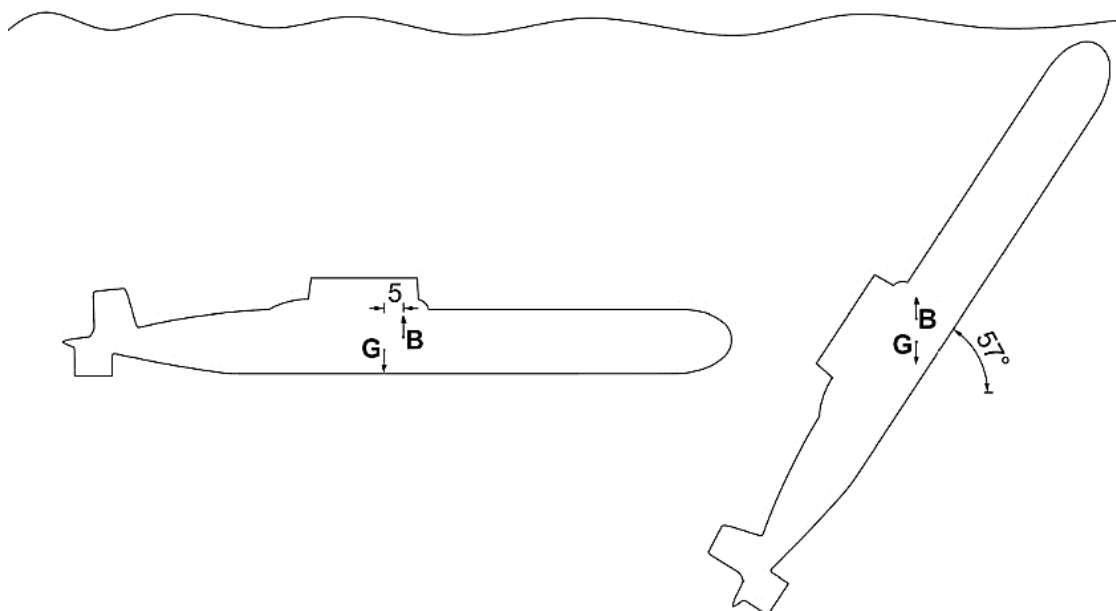
Gdje je φ kut nagiba podmornice.



Slika 48. Stabilitet podmornice

Do sada je samo spomenut poprečni stabilitet površinskih brodova i podmornica. Kod podmornica poprečni stabilitet se jednostavno postiže i održava, dok se za uzdužni stabilitet podmornice teško postiže i održava. Kod podmornica, za razliku od površinskih brodova, najmanja udaljenost između uzdužnog centra istisnine (engl. longitudinal center of bouynacy, u daljnjem tekstu koristiti će se izraz LCB) i uzdužnog težišta mase sistema (engl. longitudinal

center of gravity, u daljnjem tekstu koristiti će se izraz LCG) uzrokuje velike trimove. Ako se se prodrli vodu gleda kao izgubljenju istisninu onda se promatrajući sliku (Slika 49) može reći da je zbog udara torpeda u krmu podmornice došlo do njenog naplavlivanja radi čega se je LCB pomaknuo 5 m prema pramcu u odnosu na LCG. To je neravnotežno stanje u kojem uzgon svojim djelovanjem oko težišta mase podmornice stvara moment koji povećava trim (Ψ) podmornice sve dok se ne postigne ravnotežno stanje, tj. dok težište istisnine ne dođe iznad težišta mase. Trim u ravnotežnom stanju za razmatrani slučaj iznosi čak 57° . Iz tog razloga prilikom plovidbe ispod morske površine trim podmornice se stalno kontrolira i održava koliko je moguće manjim. Iz toga se zaključuje da se ravnotežno stanje podmornice u poprečnom smislu lakše održava i postiže u odnosu na ravnotežno stanje u uzdužnom smislu. Važno je napomenuti da kod površinskih brodova nije toliko izražena osjetljivost na trim.



Slika 49. Trim podmornice uslijed male promjene uzdužne udaljenosti centra istisnine i centra mase sistema

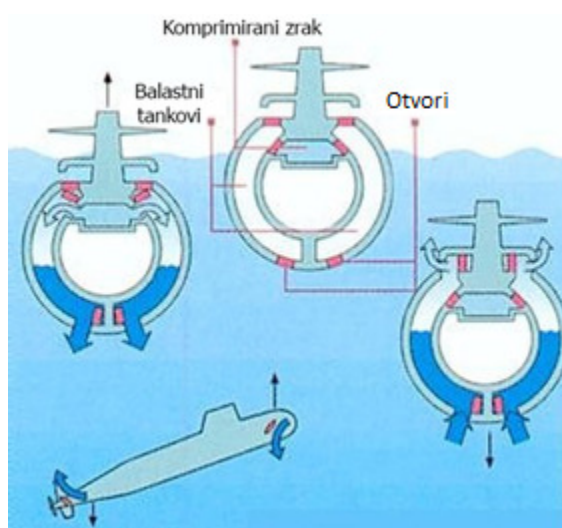
6.2.3. Trim i balastiranje podmornice

Nuklearne podmornice većinu svog životnog vijeka provode ispod vodene površine, rijeko izranjaju a kada izrone na površini se kratko zadržavaju i to najčešće u lukama za vrijeme ukrcaja zaliha i izmjene posade. Stoga je za podmornice upravljivost ispod morske površine, osobito karakteristika mijenjanja dubine plovidbe, od primarne važnosti. To se postiže promjenom vrste uzgona koja djeluje na podmornicu. Za manevar izranjanja mora postići pozitivni uzgon, a za manevar uranjanja mora postići negativni uzgon dok za vrijeme krstaške

vožnje ispod vodene površine mora održati neutralni uzgon. Postizanje neutralnog uzgona je samo teoretsko i to stanje je nemoguće postići. U slučaju da podmornica miruje ispod površine (podmornica može imati potrebu mirovanja kako bi time ugasio motore i time izbjegla detekciju od neprijatelja) ona u svakom trenu ili malo tone ili malo izranja dok miruje. Treba također imati na umu da dubljim zaronom podmornice raste i hidrostatski tlak koji djeluje na nju. Što se tlak više povećava to se struktura podmornice više tlači, tj. sabija prilikom čega se smanjuje volumen istisnine. To se anulira pražnjenjem balastnih tankova.

Podmornica dubinu plovidbe, tj. vrstu uzgona koja djeluje na nju, ostvaruje pomoću balastnih tankova. Balastiranje se vrši tako da se u balastne tankove upumpava zrak čime se istiskuje voda iz tankova (Slika 50), a ne da se upumpava voda kao što je slučaj kod površinskih brodova.

Princip je u suštini vrlo jednostavan, kada je podmornica na površini balastni tankovi su prazni i ispunjeni zrakom i pri tome su otvori na njihovom dnu zatvoreni. Kada podmornica zaranja otvaraju se otvori na dnu te voda prodire u balastni tank sve dok se sila prodiranja vode (hidrostatski tlak dubine na kojoj se nalazi podmornica) ne izjednači s tlakom zraka u balastnom tanku koji se regulira. U trenutku kada se balastni tank želi isprazniti mora se povećati tlak zraka u njemu. Tlak zraka postaje veći od hidrostatskog tlaka te istiskuje fluid iz tanka van kroz otvorene otvore. Taj proces traje sve dok se tlakovi međusobno ne izjednače.



Slika 50. Princip balastiranja podmornice [44]

Kada dostigne zadanu dubinu, podmornica mora održavati što ravniji trim. Trim podmornice se javlja iz više razloga. U neoštećenom stanju volumen istisnine je nepromjenjiv osim kada se pune i prazne balastni tankovi, no ako se pretpostavi da je podmornica na potrebnoj dubini i da nema trim, s vremenom će se trim svejedno pojaviti. Trim se javlja zbog međusobnog pomaka LCB-a i LCG-a. Do tih promjena dolazi zbog mnogih radnji u podmornici kao što su šetnja posade, ispaljenje torpeda, ispaljenje balističkih raketa, trošenja zaliha hrane i pića, zalihe goriva, pitke vode, spremanja crnih i sivih voda itd. Navedene radnje i promjene se događaju

cijelo vrijeme što znači da se i trim podmornice cijelo vrijeme mijenja. Manji kut trima se ispravlja dinamičkim putem, tj. sve podmornice imaju hidroplanove čiji se napadni kut može regulirati. Vožnjom podmornice nekom brzinom ispod morske površine ostvaruje se uzgon na hidroplanovima te o njihovom napadnom kutu zavisi i kut kretanja podmornice. Na istom principu lete zrakoplovi, krila zrakoplova su zapravo hidroplanovi kod podmornica, izvedba je drukčija ali je fizikalno objašnjenje isto. Istim putem se mogu ostvariti manje razlike u dubini na kojoj podmornica plovi. Poništenje trima hidroplanocima ovisi ponajviše o stručnosti kormilara i u novije vrijeme o opremi (kompjutori) kojom je podmornica opremljena.

U slučaju da se dubina na kojoj podmornica plovi mora brzo promijeniti, onda se trim kontrolirano promijeni za veliki kut što se radi balastiranjem pramčanih i krmenih trim tankova. Uz postignuti željeni trim i rad vijka, podmornica može vrlo brzo mijenjati dubine plovidbe. Najveći sigurni kut trima s kojim podmornica može ploviti je 25° no u slučaju potrebe kratkotrajno može ploviti trimom $^\circ$ od 30 (Slika 51).



Slika 51. Izranjanje podmornice pri maksimalnoj brzini i trimu [45]

6.2.4. Usporedba prodrle vode i izgubljene istisnine

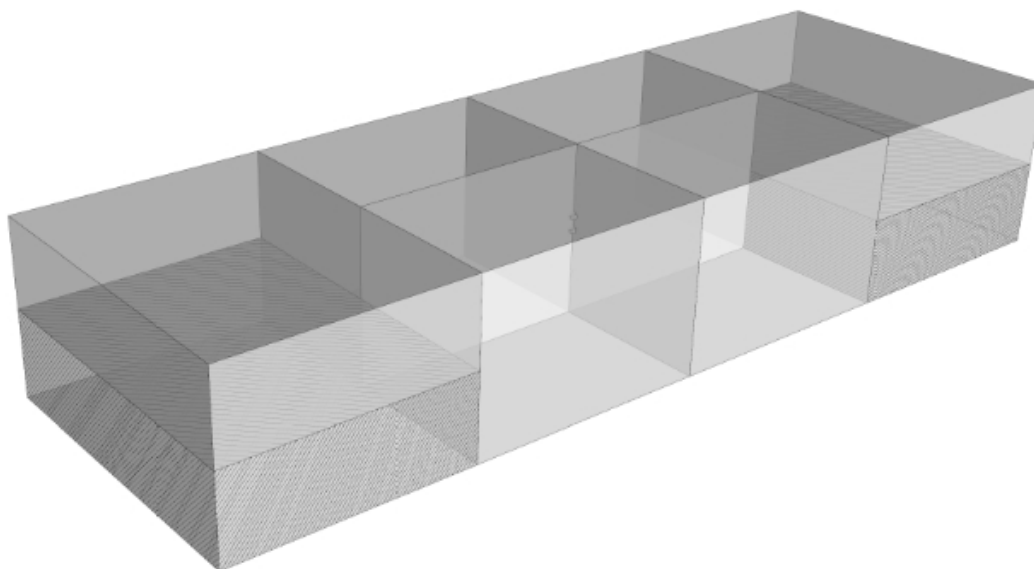
Ispunjenje dijela prostora podmornice, bilo balastiranjem ili uslijed prodora vode zbog oštećenja, može se razmatrati na dva načina. Ta ukrcana, tj. prodrla voda može se smatrati dodatnim ukrcanim teretom ili izgubljenom istisninom.

Kad se prodrla, ukrcana voda razmatra kao ukrcana masa tada iznos i težište uzgona podmornice ostaju nepromijenjeni. Prostor u koji je ukrcana, tj. u koji je prodrla voda se u tom

slučaju smatra kao neko tijelo koje ispunjuje volumen unutar volumena, uzgona prilikom čega to tijelo ima neku svoju masu zbog čega se mijenja položaj i iznos mase cijele podmornice (sistema).

Kada se prodrila ili ukrcana voda razmatra kao izgubljeni volumen istisnine tada sveukupna masa i težište mase sistema ostaju nepromijenjeni ali se prostor u koji je ukrcana, tj. prodrila voda više se ne zbraja u sveukupnoj istisnini nego se izostavlja, uslijed čega se smanjuje iznos i oblik volumena (a time i njegovo težište) koji sudjeluje u istisnini.

Budući da se ovaj rad bavi podmornicom, brodom koji većinu svog životnog vijeka ostvari ispod površine, onda će se tvrdnja, da se razmatranjem dodatne mase ili izgubljene istisnine dobiva isti rezultat, dokazati na primjeru potpuno uronjenog tijela. U primjeru će se razmotriti „ponton podmornica“ (Slika 52).



Slika 52. Prikaz „pontona podmornice“

U primjeru se uzima da je ponton podmornica potpuno zaronjena i da u potpunoj ravnoteži pluta na nekoj dubini. Pod potpunom ravnotežom smatra se da podmornica pluta bez trima ili nagiba na nekoj dubini te da ne izranja niti zaranja. Masa pontona iznosi 1896.33 tone te ima dva balastna tanka (šrafirani su na crtežu), jedan na pramcu i drugi na krmi. Balastni tankovi su ispunjeni morem. Budući da je ponton potpuno simetričan i bez ikakvog trima ili nagiba u obzir se uzimaju samo promjene položaja težišta mase sistema i težišta istisnine po Z osi jer, zbog simetrije trupa, promjene tih položaja u ostalim osima nema.

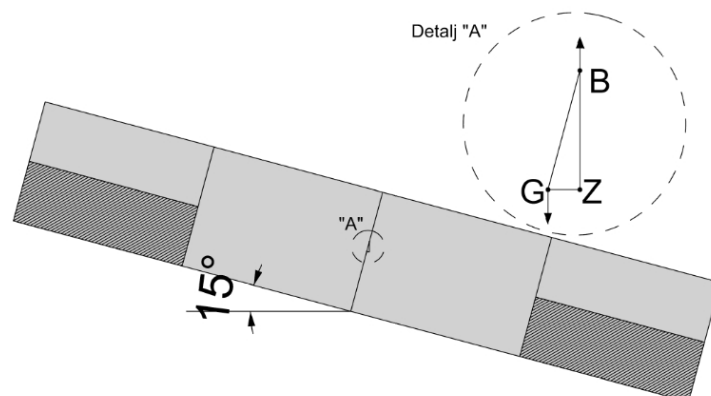
Razmatranje u kojem se balast smatra kao dodatna masa

Kako je napomenuto, u ovom razmatranju smatra se da volumen cijelog trupa pontona sudjeluje u istisnini što znači da se VCB nalazi na pola visine pontona, odnosno na 3.0848 m. Na istom položaju nalazi se i težište mase sistema G. Volumen cijelog pontona iznosi 2466.8 m³ što daje masu istisnine od 2528.43 t. U tom volumenu balastni tankovi čine 616.69 m³. Volumen balastnih tankova je ispunjen morem mase 632.1 tone. VCG balastnih tankova se po Z osi nalazi na 1.54 m zbog čega se VCG cijelog sistema spušta na 2.6986 m. Masa pontona je 1896.33 t dok je masa mora u balastnim tankovima 632.1, t što zbrojeno daje sveukupnu masu pontona od 2528.43 t. Time je postignut stabilitet težine podmornice jer masa istisnine također iznosi 2528.43 t. Te dvije sile se poništavaju čime je ponton u ravnotežnom stanju. Međusobna udaljenost između VCB-a i VCG-a iznosi $3.0848 - 2.6986 = 0.3862$ m.

Razmatranje u kojem se balast smatra izgubljenom istisninom

U ovom razmatranju masa pontona je nepromijenjena. Masa pontona iznosi 1896.33 t, a VCG cijelog pontona se nalazi na 3.0848 m. Ukrcajem mora volumen pontona koji sudjeluje u istisni se smanjuje za volumen koji je more ispunilo u pontonu, dakle volumen istisnine (∇) se smanjuje s 2466.8 m³ za 616.69 m³ na 1850.11 m³. Prije punjenja balastnih tankova VCB pontona se nalazio na 3.0848 m, no nakon punjenja balastnih tankova ono se je podiglo na 3.5989 m. Masa istisnine nakon punjenja balasta iznosi 1896.33 tone što je jednako masi pontona, čime se te dvije sile poništavaju i ponton je u ravnoteži. Udaljenost između VCG-a i VCB-a iznosi $3.59 - 3.08 = 0.5141$ m.

U oba slučaja podmornica se nalazi u stanju ravnoteže, ali se odmah uočavaju dvije razlike u rezultatima tih dviju metoda: iznosi duljine vertikalnih spojnice \overline{GB} se međusobno razlikuju kao i iznosi masa istisnine, tj. masa pontona. No, glavna karakteristika stabiliteta je zapravo iznos momenta statičkog stabiliteta (M_{ST}). Ako se na ponton djeluje nekom silom koja uzrokuje trim pontona od 15° javiti će se moment poluge statičkog stabiliteta koji uzrokuje masa istisnine (B) svojim djelovanjem oko težišta mase sistema (G) na kraku \overline{GZ} (poluga statičkog stabiliteta). M_{ST} je veličina koja ostvaruje ravnotežni položaj pontona svojim djelovanjem (Slika 53).



Slika 53. Ponton podmornica pod trimom od 15°

Da bi se mogao izračunati moment poluge statičkog stabiliteta potrebno je prvo utvrditi duljinu spojnice \overline{GZ} , tj. duljinu poluge stabiliteta. Izraz za izračunavanje duljine \overline{GZ} je sljedeći:

$$\overline{GZ} = \sin\Psi \cdot \overline{GB} \quad (45)$$

Kut trima, Ψ , u oba slučaja iznosi 15° dok se duljina spojnice \overline{GB} u dvjema metodama razlikuje.. Dakle, M_{st} jednak je umnošku poluge statičkog stabiliteta i mase istisnine U. Izraz konačno glasi:

$$M_{st} = \overline{GZ} \cdot U = \sin\Psi \cdot \overline{GB} \cdot U \quad (46)$$

Poluge statičkog stabiliteta za obje metode glasi:

- Metoda dodane mase: $M_{st} = \sin 15^\circ \cdot 0.3862 \cdot 2528.43 = 252 \text{ tm}$
- Metoda izgubljene istisnine: $M_{st} = \sin 15^\circ \cdot 0.5141 \cdot 1896.33 = 252 \text{ tm}$

Ovim primjerom dokazano je da, ako se ispravno koriste, obje metode daju iste rezultate.

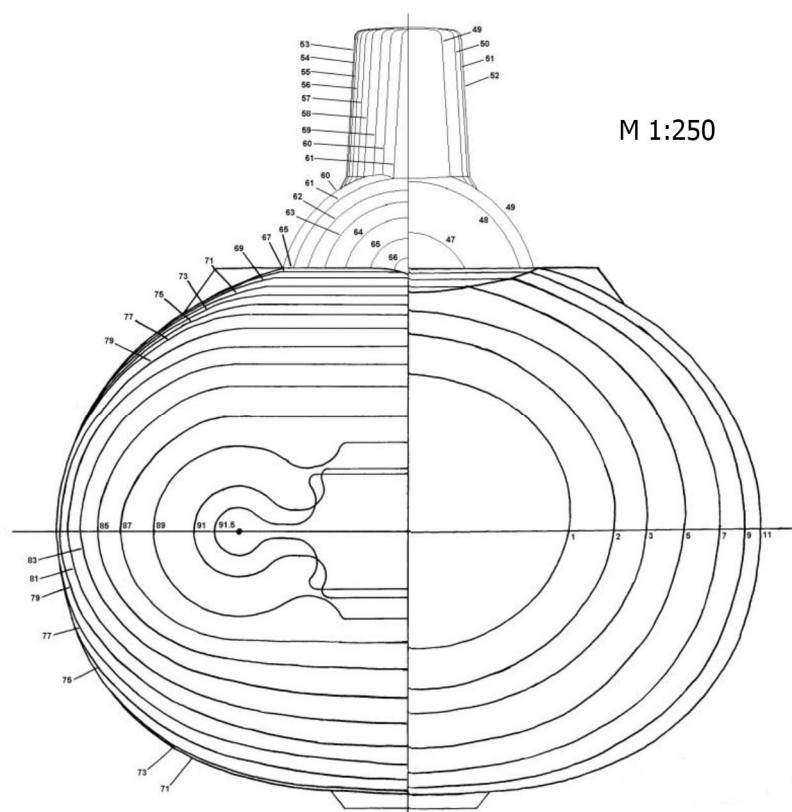
Prilikom proračuna stabiliteta podmornice Typhoon klase koristit će se metoda izgubljene istisnine zato što se u grafičkom 3D modelu, koji je izrađen pomoću računalnog programa „Rhinceros 3D 5.0“, lako dobivaju težišta istisnina pomoću kojih se jednostavno računaju trimovi i nagibi Typhoon klase podmornice u oštećenom stanju u računalnom programu „Excel“. Iako je poluga statičkog stabiliteta veličina koja definira svojstvo stabiliteta ona se ipak kroz ostatak analize neće računati. Naime, prema propisima ABS-a definirani su jedino pravila za odnos VCG-a i VCB-a te trim. Zato će se u nastavku kao mjerodavnim pokazateljima stabiliteta uzeti međusobni uzdužni, vertikalni i poprečni odnosi težišta mase i težišta mase istisnine Typhoon klase podmornica. Također, kao mjerodavnim pokazateljem uzet će se i iznosi tima Ψ i nagiba ϕ .

6.3. Definiranje forme, čvrstih trupova i balastnih tankova Typhoon klase podmornica

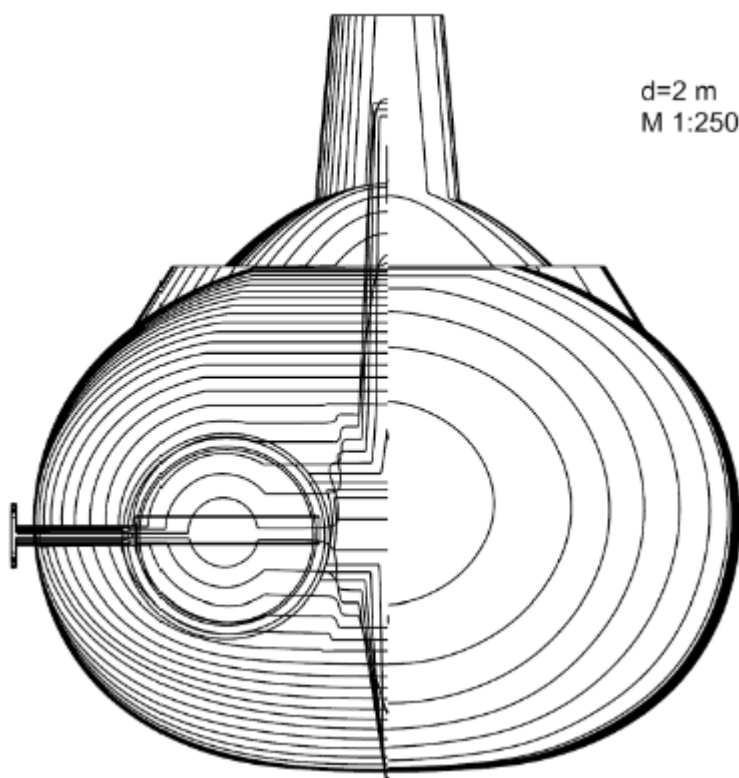
U ovom poglavlju prvo će se analizirati stabilitet Typhoon podmornice u neoštećenom stanju ispod i na morskoj površini, a zatim će se provesti usporedba karakteristika stabiliteta u oštećenom stanju ispod površine s karakteristikama stabiliteta za ista stanja oštećenja na morskoj površini. No, da bi se proveo proračun stabiliteta prvo je potrebno kreirati formu lakog trupa kako bi se omogućio točan smještaj svih prostora na Typhoon podmornicu te u konačnici provesti centraciju Typhoon podmornice. Također, potrebno je analizirati i smjestiti sve prostore uključujući balastne tankove te analizirati, procijeniti i u prostoru odrediti položaje svih masa na Typhoon podmornici.

6.3.1. Definiranje forme lakog trupa

Točno kreiranje forme ne utječe na točnost rezultata analize stabiliteta, no zbog točnijeg smještaja svih prostora i radi kvalitete samog rada, točnost 3-D modela se pokušala staviti na najvišu razinu. U modeliranje lakog trupa utrošeno je preko 100 sati rada ponajviše zato jer nije moguće dobiti fotografije ili bilo kakve druge podatke o dijelu forme ispod vodne linije. Najzahtjevniji dio trupa Typhoon podmornice za modeliranje je bila njezina krma, također zbog nemogućnosti dobivanja jednoznačnih podataka. Forma je definirana pomoću pronađenih teoretskih rebara (Slika 54). Ustanovljeno je da pronađena teoretska rebra nisu posve točna. Naime, nacrtana su rukom najvjerojatnije od strane nekog maketara koji je izradio maketu Typhoon podmornice no, prilikom crtanja teoretskih rebra isti nije koristio nikakva pravila brodograđevne struke. Do tog zaključka se je došlo zato jer kad bi se duljina Typhoon podmornice podijelila s brojem označenih rebara dobio bi se takav razmak rebara koji bi kreirao formu s duljinom nadgrađa od 20 m, dok je u stvarnosti nadgrađe dugačko 30 m. Iako je pronađeni plan teoretskih rebara ustanovljen kao krivi ipak, dobro opisuje svako rebro za sebe. Iz pronađenog plana teoretskih rebara svako rebro je smješteno u prostoru u računalnom programu „Rhinoceros 3D 5.0“ (u daljnjem tekstu program Rhino) prema pronađenom nacrtu lakog trupa u tlocrtu, nacrtu i bokocrtu (Slika 5). Zatim su se (u istom računalnom programu) provela potrebna uvećanja i smanjenja, prvo u jednoj a zatim u drugoj osi, kako bi se dobio što vjerodostojniji raspored i oblik rebara lakog trupa. Pomoću toga je dobivena površina trupa na koji je naposljetku dodano nadgrađe i detaljno modelirana krma. Krajnji rezultat je forma već prikazana u poglavlju 3 (Slika 7, Slika 8, Slika 9), dok je novi raspored teoretskih rebara prikazan slijedećom slikom (Slika 55).

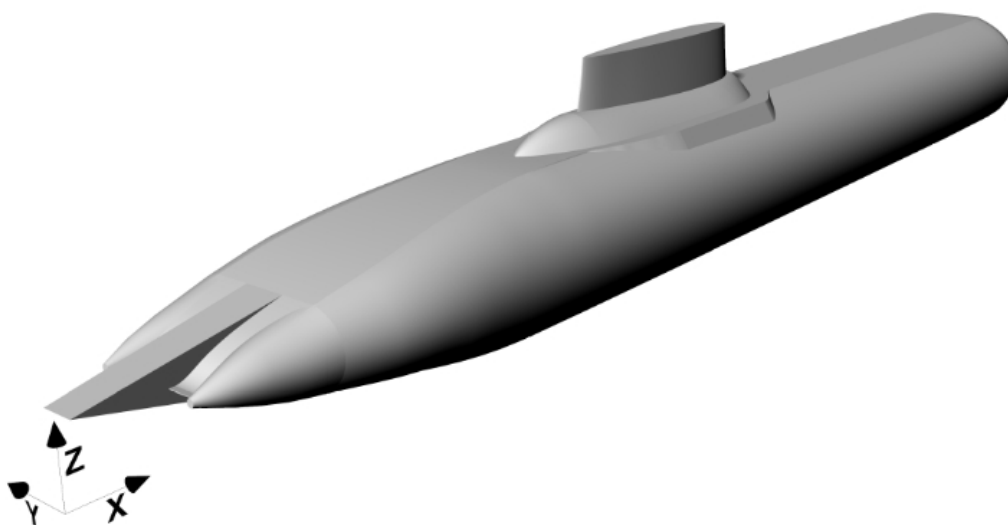


Slika 54. Pronađena teoretska rebra [47]



Slika 55. Teoretska rebra izrađenog modela

Nakon što je model uspješno kreiran pristupilo se je prilagođavanju forme tako da se pomoću programa Rhino kreira ulazna datoteka za računalni program GHS u kojem se je analizirao stabilitet podmornice na površini mora. Detalji forme na području krme morali su biti reducirani jer zbog njezine kompleksnosti program GHS nije u stanju ispravno prepoznati te dijelove trupa. Iz istog razloga su izbačeni i pramčani hidroplanovi. Model lakog trupa s izvršenom redukcijom detalja prikazan je slijedećom slikom (Slika 56). Volumen originalnog modela iznosi 48737.13 m^3 dok volumen reduciranog modela iznosi 48677.5 m^3 , što čini razliku manju od 2 promila. Ta razlika je u potpunosti zanemariva. Za sve proračune koristit će se reducirana forma.

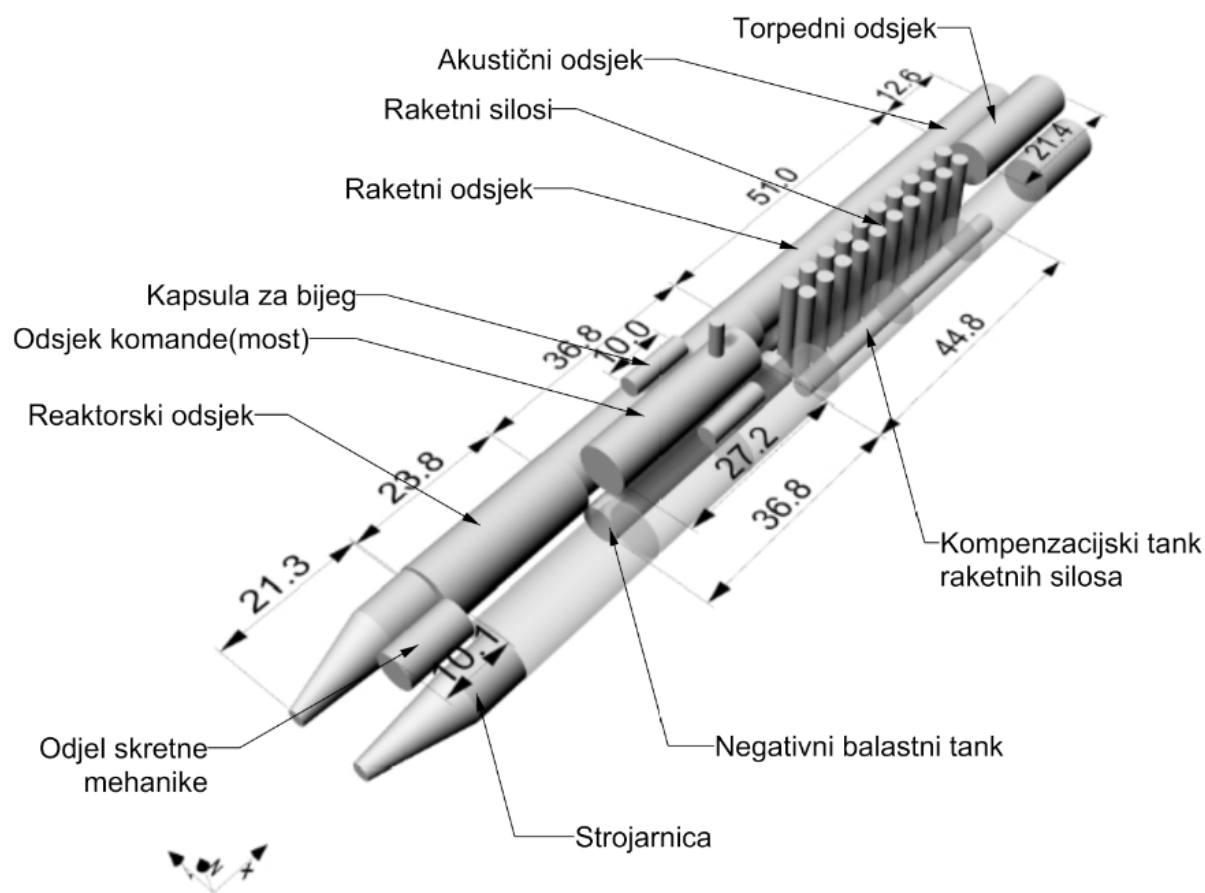


Slika 56. Prikaz pojednostavljenog modela

6.3.2. Definiranje čvrstih trupova unutar lakog trupa

Unutar lakog trupa, koji je hidrodinamički oblikovan, smješteni su čvrsti trupovi. Pod čvrstim trupovima podrazumijevaju se trupovi cilindričnog oblika koji mogu izdržati tlakove na velikim dubinama. Njihov smještaj je od primarne konstrukcijske važnosti zato jer su oko njih, tj. između njih i lakog trupa smješteni balastni tankovi. Neki od balastnih tankova su konstruirani tako da izdrže tlakove na velikim dubinama čime dio opterećenja prenose i na cilindre čvrstih trupova na koje su oslonjeni. O rasporedu balastnih tankova detaljno se bavi poglavlje 6.3.3.

Na slici (Slika 57) je prikazan raspored čvrstih trupova bez prikaza lakog trupa. Radi boljeg prikaza čvrsti trupovi s desne strane Typhoon podmornice su prikazani kao prozirni objekti kako bi se bolje prikazali ostali čvrsti trupovi. Na istoj slici označena je podjela čvrstih trupova te njihove duljine.



Slika 57. Prikaz čvrstih trupova, njihova podjela i duljine

6.3.3. Balastni i ostali tankovi

Na podmornicama postoji više vrsta balastnih tankova. Najosnovnija podjela je na tankove koji mogu i ne mogu podnijeti tlakove na većim dubinama, te na čvrsti balast.

I.) Tankovi koji ne mogu podnijeti tlakove na većim dubinama

Tankovi koji ne mogu podnijeti veće tlakove se dijele u dvije grupe. Tankove koji su opremljeni sustavom za izbacivanje vode, odnosno glavni balastni tankovi (engl. main ballast tanks – u daljnjem tekstu koristiti će se skraćenica MBT) i tankove koji imaju otvore kroz kojih se ti tankovi automatski pune ili prazne ovisno da li podmornica zaranja ili izaranja odnosno slobodno naplavljive tankove (engl. free flood tanks – u daljnjem tekstu koristiti će se skraćenica FF).

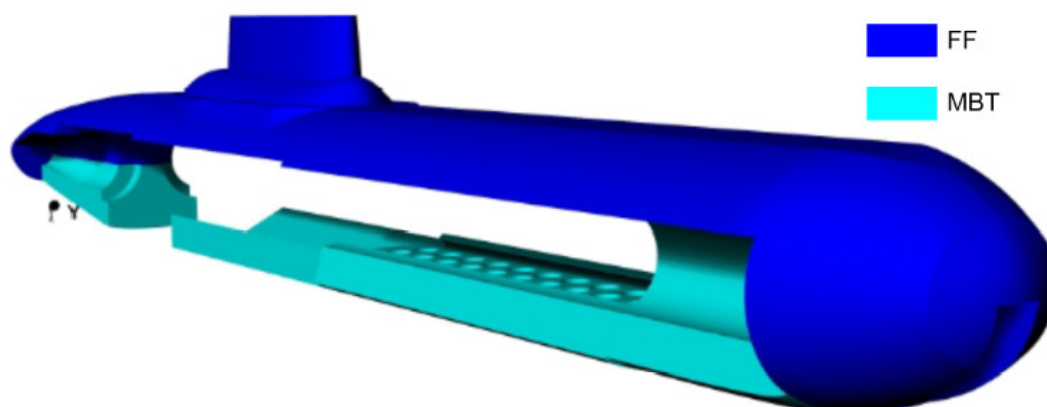
I.A.) Glavni balastni tankovi, MBT

Konstruirani su tako da mogu podnijeti tlakove na manjim dubinama. Smješteni su između glavnih trupova i kobilice. Ovi tankovi ne mogu sudjelovati u uzgonu prilikom vožnje ispod površine zato jer bi se time težište istisnine previše spustilo čime bi stabilitet podmornice u

zaronjenom stanju bio ugrožen. Uobičajeni gaz Typhoon podmornice je oko 11.5 m prilikom kojeg su propeleri potpuno uronjeni no, ako je potrebno [48], zbog ulaza u luku ili prilikom dokovanja, MBT i ostali tankovi se mogu isprazniti prilikom čega Typhoon podmornica može smanjiti gaz na 9m. Također, MBT tankovi mogu dobro poslužiti kao dodatni uzgon prilikom probijanja leda za vrijeme izrona na zaleđenom dijelu mora.

I. B.) Slobodno naplavljivi tankovi, FF

FF tankovi nalaze se na krmi, nadgrađu, iznad čvrstih trupova te na pramcu (Slika 58). Njihova konstrukcija je izvedena tako da je dijelom omeđena konstrukcijom lakog trupa i dijelom konstrukcije čvrstog trupa. Nisu izvedena da izdrže tlakove na većim dubinama, već se zaronom Typhoona pune prilikom čega se hidrostatski tlakovi s unutrašnje i vanjske strane njihove konstrukcije poništavaju, što znači da njihova konstrukcija nije podvrgnuta nikakvom tlaku. FF tankovi nemaju nikakvu funkciju. Iako se položaj FF tankova iznad čvrstog trupa čini idealnim za smještaj balastnih tankova gdje bi doprinijeli stabilitetu podmornice u zaronjenom stanju, ipak prilikom izrona oni se nalaze iznad vodne linije te ne pridonose stabilitetu [42].



Slika 58. Prikaz smještaja MBT i FF tankova

II) Tankovi koji mogu podnijeti tlakove na većim dubinama

Ovi tankovi se također dijele u dvije glavne grupe: tankovi koji su cijelo vrijeme prazni, tj. ispunjeni zrakom, odnosno tvrdi tankovi (engl. hard tanks – u daljnjem tekstu će se koristiti skraćenica HT) i varijabilni balastni tankovi (engl. variable ballast tanks – u daljnjem tekstu će se koristiti skraćenica VBT).

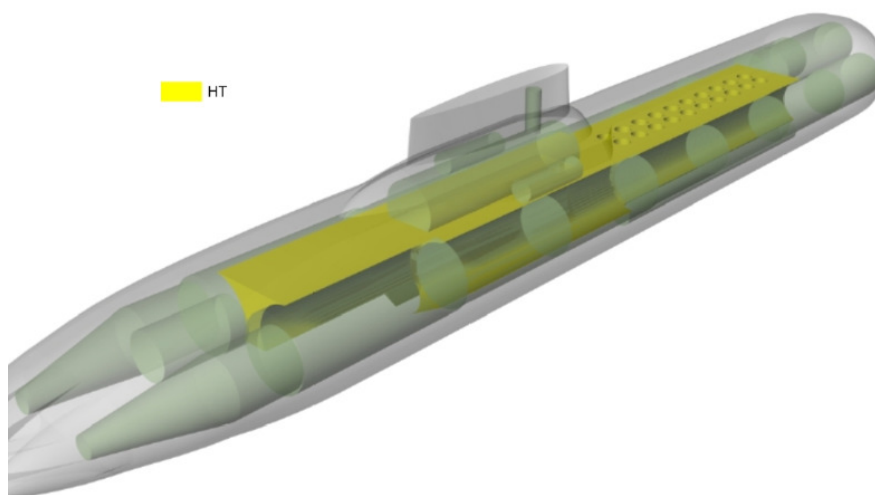
II.A.) Tvrdi tankovi, HT

HT se koriste onda kada istisnina svih neispunjenih odjeljaka i prostora u podmornici nije dovoljno velika da podrži masu podmornice u zaronjenom stanju. Masa Typhoona 24853 t, dok

masa istisnine habitabilnih prostora i ostalih prostora koji sudjeluju u uzgonu iznosi 19493 t. Očigledno je da u takvoj situaciji Typhoon ne može ploviti pod vodom stoga su mu potrebni HT tankovi. Analizom je procijenjeno da je najbolji smještaj HT tankova između glavnih trupova. Taj prostor je već dijelomično ispunjen drugim prostorima poput raketnih silosa što ga zapravo čini idealnim za smještaj HT iz dva razloga.

Prvi je taj što je izvedbom drugih prostora između glavnih trupova znatno smanjen razmak između oslonaca strukture HT tankova čime je omogućena njihova veća čvrstoća. No, budući da konstrukcija HT tankova nije cilindrična, da bi podnijeli opterećenja prilikom žonje na velikim dubinama, potrebno ih je ojačati s puno čvrstih pregrada. Zbog velikog pregrađivanja, prostor unutar HT tankova nije podoban za korištenje od strane posade. Tako pregrađen prostor koji odolijeva visokim tlakovima može se iskoristiti za postavljanje raznih kablova, cjevovoda itd.

Drugi razlog je taj što kad bi, u protivnome, na tu poziciju bili smješteni balastni tankovi koji bi se punili ili praznili, tada bi zbog već pozicioniranih prostora u tom razmaku došlo do povećane buke, tj. „bućkanja“ vode prilikom balastiranja ili vožnje Typhoona na nekom trimu. Izvedeni HT prikazani su slijedećom slikom (Slika 59).



Slika 59. Raspored HT-ova unutar lako trupa i između glavnih trupova

II.B.) Varijabilni balastni tankovi, VBT

Kao što samo ime kaže količina vode u tim tankovima je varijabilna. Ova grupa tankova se dijeli na slijedeće skupine tankova: trim tankove, razne kompenzacijske tankove, tankove zaliha, tankove goriva, sigurnosne tankove i negativne tankove.

II.B.1.) Trim tankovi

Trim tankovi su smješteni na pramcu i na krmi podmornice. Služe za reguliranje trima podmornice u zaronjenom stanju kako bi podmornica mogla mijenjati dubine plovidbe. No, budući da se ovaj rad bavi statičkim stabilitetom onda se ovi tankovi neće uzeti u obzir.

II.B.2.) Kompenzacijski tankovi

U ovoj skupini postoji mnogo vrsta tankova među kojima su tankovi za kompenzaciju potrošenog goriva, zaliha vode, ispaljenih torpeda, crnih i sivih voda, ispaljenih balističkih raketa itd. Budući da ne postoje nikakvi podaci o balastnom sistemu Typhoon podmornice onda je jako teško pretpostaviti pozicije nabrojenih tankova. Jedino je pronađen podatak o poziciji kompenzacijskog tanka ispaljenih balističkih raketa (u daljnjem tekstu KT) stoga će se samo taj balastni tank uzeti u obzir.

Masa R-39 raketa (87.6 t) je veća nego što je masa vode koja može ispuniti silos (volumen silosa je 72.38 m^3 u što može ući 74.2 t mora što za svih 20 raketa čini razliku od 268 t. To znači da bi nakon ispaljenja raketa i punjenja silosa morem trebalo ukrcati još mora na Typhoon kako bi se anulirala razlika u masama. Iz tog razloga konstruirani su kompenzacijski tankovi koji se nakon ispaljenja raketa pune morem kako bi se nadoknadila razlika u masi raketa i mase mora koje naplavi silos. Ne postoji podatak da li su silosi opremljeni pumpama za izbacivanje vode pa će se pretpostaviti da nisu, što znači da nakon ispaljenja kompenzacijski tankovi ostaju naplavljeni sve dok se ne ukrcaju nove rakete. No, budući da se ispaljenje raketa događa samo u slučaju nuklearne kataklizme svijeta ili za vrijeme vježbi, pretpostavlja se da se KT mogu koristiti barem djelomično u kombinaciji s negativnim tankom. Djelomično se mogu koristiti zato jer njihov volumen iznosi 633 m^3 , dok potreban volumen za anuliranje mase ispaljenih raketa iznosi 274.7 m^3 . Razlog te dvojne funkcije KT-a je povoljan položaj u odnosu na težište mase i uzgona što znači da njihovim korištenjem u kombinaciji s negativnim tankom moguće postići ravni trim prilikom vertikalnog urona ili zarona. U normalnoj vožnji u zaronjenom stanju smatra se da su KT-ovi prazni.

II.B.3.) Tankovi zaliha

Svaka podmornica ima tankove zaliha pitke vode. No, budući da je Typhoon podmornica na nuklearni pogon te ima mogućnost stvaranja svoje pitke vode onda su ti tankovi puno manjih dimenzija. Naime u tom slučaju nema potrebe za tankovima kapaciteta zalihe vode za cjelokupnu misiju već je potrebna zaliha vode za dan-dva. Zbog manjih dimenzija smatra se da

nemaju veliki utjecaj na stabilitet zbog čega nisu uzeti u obzir. Također, postoje i tankovi zalihe vode za rad baterija, no oni iz istog razloga nisu uzeti u obzir.

II.B.4.) Tankovi goriva

Kao što im i samo ime govori to su tankovi u kojima je spremjeno gorivo za pogon motora s unutarnjim izgaranjem. Analizom fotografija koje prikazuju rastavljanje jedne podmornice Typhoon klase primijećen je tank (Slika 15), koji nalikuje na trapez, smješten između i ispod reaktorskih cilindara. Zaključeno je da bi to mogli biti tankovi goriva. U daljnjem tekstu koristit će se skraćenica TG.

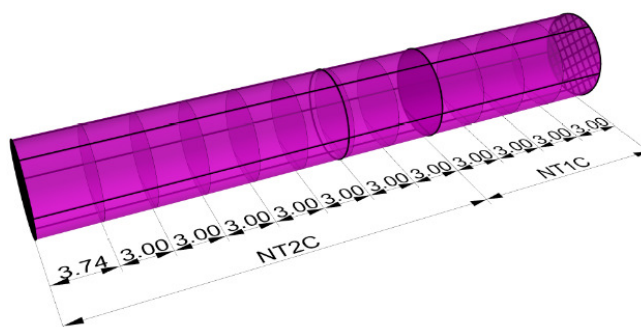
II.B.5.) Sigurnosni tankovi

Sigurnosni tankovi (engl. safety tanks – u daljnjem tekstu koristit će se skraćenica ST) se još mogu nazvati tankovima rezerve istisnine. Njihova je funkcija, ako iz nekog razloga dođe do proboja jednog od prostora koji sudjeluju u uzgonu, da taj gubitak anuliraju svojim pražnjenjem. U normalnoj plovidbi ispod površine oni su u potpunosti napunjeni morem.

II.B.6.) Negativni tank

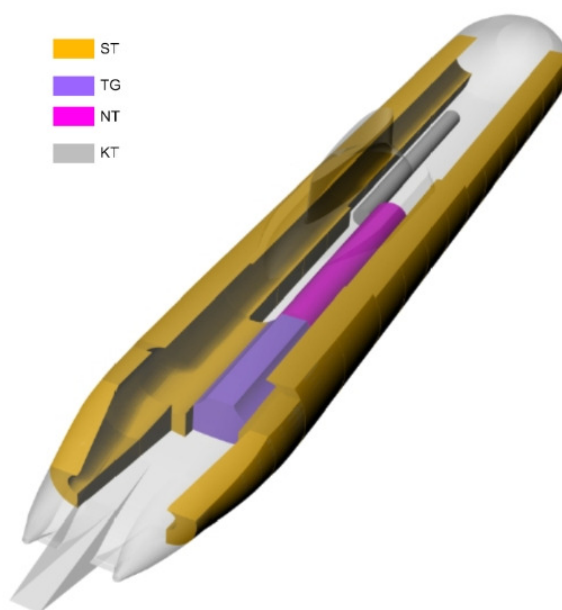
Negativni tank (engl. negative tank – u daljnjem tekstu koristit će se skraćenica NT) služi kako bi se podmornica, dok je potpuno zaronjena, mogla vertikalno kretati. U literaturi se navodi kako su ovi tankovi skoro prazni [46] no, ne navodi koliko iznosi to „skoro prazno“. Uzet će se da je standardna popunjenost ovih tankova oko 30%. Kada podmornica plovi na površini i iz nekog razloga mora brzo zaroniti tada se NT puni do 100% ispunjenosti. Podmornica počinje tonuti i kada postigne određenu dubinu tank se isprazni do početne popunjenost od 30%. Ako je potrebno da podmornica smanji dubinu ili u potpunosti izroni, a istovremeno nema potrebu da se taj manevar izvede u kratkom vremenskom roku i da ne mijenja trim, to se može izvesti tako da se iz NT-a izbaci more koje ispunjuje stalnih 30% NT-a. Podmornica se počinje vertikalno kretati smanjujući dubinu. Nije poznato s koliko nepropusnih pregrada je podijeljen NT. Zbog njegove veličine od 905 m^3 i duljine od 36.75 m, pretpostavka je da je podijeljen s više nepropusnih pregrada i to iz dva razloga. Prvi je taj što bi ukrcano more u NT-u zbog njegove velike duljine uzrokovalo veliku uzdužnu nestabilnost zbog učinka slobodne površine. Drugi razlog je taj što NT po X osi počinje na 63.38 m i završava na 100.14 m, čime se težište nepregrađenog NT-a nalazi na 81.76 m. To znači da bi se njegovim punjenjem i pražnjenjem uzrokovao trim Typhoona. Zbog toga se smatra da je NT podijeljen s nepropusnim pregradama tako da je njihov međusobni razmak 3 m. Time se prva 4 odjeljka, u proračunu su označena s NT1C dok je ostatak NT-a označen s NT2C (Slika 60), koja zauzimaju 295.56 m^3 (to čini

približno 33% cijelog NT-a), smatraju ispunjenima morem prilikom normalne vožnje. Uzdužno težište NT1C se nalazi na 94.13 m (težište mase i uzgona Typhoona se nalazi na 94.321 m što je detaljno opisano u poglavlju 6.3.6.) što znači da se pražnjenjem ili punjenjem NT1C u kombinaciji s KT tankom može postići vertikalni izron. Također, navedeni manevar se može izvesti u kombinaciji s trim tankovima na pramcu i krmi.



Slika 60. Prikaz podjele NT-a

Prikaz navedenih varijabilnih tankova koji se uzimaju u obzir prikazani su sljedećom slikom (Slika 61).



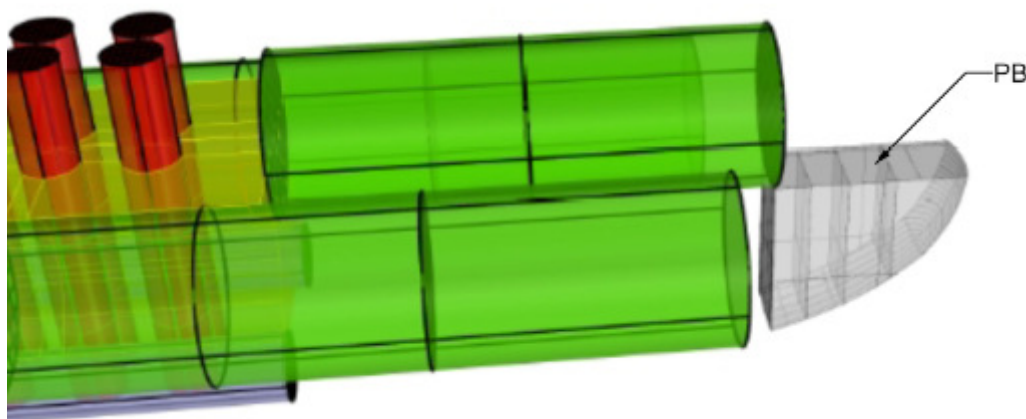
Slika 61. Prikaz smještaja ST, TG, NT i KT unutar lakog trupa

III.) Čvrsti balast

Ideja postavljanja čvrstog balasta na podmornicu se na prvi pogled čini protiv osnovnog načela projektiranja podmornice, a to je da se na podmornicu smješta što manje nepotrebne mase i da zbog toga ni u kojem slučaju čvrstom balastu nije mjesto na podmornici. No, ako se malo bolje razmotri stabilitet podmornice, postavljanje čvrstog balasta na podmornicu sasvim je logično i

nužno i to iz više razloga. Moderne podmornice imaju punu formu pramca dok je forma krme fino oblikovana zbog boljeg pritjecanja fluida vijku. Drugi razlog je smještaj teških pogonskih strojeva i, u slučaju podmornica na nuklearni pogon, reaktora na krmi dok se na pramcu nalazi relativno lagana oprema. Posljedica toga je velika udaljenost između težišta istisnine i težišta mase u uzdužnom smislu. Kod konvencionalnih podmornica taj problem je manje izražen zato što one za podvodnu vožnju koriste baterije. Baterije imaju veliku masu i njihovim pažljivim smještajem po duljini podmornice može se skoro u potpunosti anulirati uzdužna udaljenost između težišta istisnine i težišta mase [42]. Masa čvrstog, tj. trajnog balasta (engl. permanent ballast – u daljnjem tekstu koristit će se skraćenica PB) iznosi i do 8% mase podmornice i postavlja se u obliku olovnih ploča [49] na kobilicu podmornice po njezinoj duljini gdje se ustanovi da je to potrebno. U slučaju potrebe postoji mehanizam koji može te ploče otpustiti, čime se smanjuje masa podmornice i u kritičnoj situaciji omogućava spas podmornice i njene posade. Razmatranjem se je došlo do zaključka da je najbolji oblik PB-a u obliku četiri deblje, jedne do druge, uspravno postavljenih olovnih ploča (Slika 62). Takvim uspravnim smještajem omogućeno je odbacivanje samo jedne ploče ako je to dovoljno za spas Typhoona.

Olovne ploče nemaju ograničenje na čvrstoću stoga ih je poželjno smjestiti izvan čvrstih trupova što znači da prilikom razmatranja veličine i centracije težišta uzgona treba uzeti u obzir i volumen koje te ploče istišću. Naime, budući da olovo nema istu gustoću kao i more onda se smještaj olovnih ploča mora gledati kao dodana masa. Olovo ima gustoću od 11.34 t/m^3 [50]. Analizom rasporeda masa i volumena koji sudjeluju u uzgonu ustanovljeno je da je potrebna masa PB-a iznosi oko 1857 t.



Slika 62. Smještaj PB-a na Typhoonu

6.3.4. Prikaz i popis prostora i tankova Typhoona

Podjela prostora i odjeljaka Typhoona se vrlo široka. Prilikom kreiranja ulazne datoteke za GHS treba definirati jedinstveno ime, naplavlljivost te kojim teretom (fluidom) se ispunjuje svaki prostor. Radi lakšeg snalaženja svakoj grupi odsjeka, tj. tankova dano je jedinstveno ime u obliku koda koji se sastoji od tri dijela, prefiksa, imena i sufiksa. Prefiksom su većinom označeni balastni tankovi, dok sufiks može imati 2 člana ovisno o broju prostora u određenom odsjeku. Sufiks, ako ima više prostora, tj. tankova iz iste grupe, može biti brojčano numeriran tako da se prvi prostori iz iste grupe koji se nalaze najbliže pramcu označuju s brojem 1, dok se ostali prostori, udaljavajući se od pramca, označavaju sa slijedećim većim rednim brojem. Sufiks u svim slučajevima sadrži slovo P, C ili S čime se označuje da li se navedeni prostor nalazi s lijeve strane (engl. portside, skraćeno P), na sredini (engl. centerline, skraćeno C) ili s desne strane (engl. starboard, skraćeno S) podmornice. Svi prostori se pune vodom osim tankova goriva koji se pune gorivom gustoće 0.87 t/m^3 i PB-a koji se, kako je već objašnjeno, „puni“ olovom gustoće 11.34 t/m^3 .

Naplavlljivost prostora se iskazuje kao koeficijent koji predstavlja mogućnost popunjenosti određenog prostora. Naime, budući da svaki prostor sadrži neku opremu, strukturu (rebra, ukrepe) itd., onda je jedan dio volumena unutar volumena prostora već zauzet vodom te je zbog toga ovaj koeficijent uvijek manji od 1. Stvarni koeficijenti naplavlljivosti su nepoznati stoga su doneseni po uzoru na drugu dostupnu literaturu [52]. U slijedećoj tablici (Tablica 6) prikazan je popis oznaka koji su dodijeljeni svim odsjecima i grupama prostora Typhoona. U istoj tablici je također dan opis svakog prostora i njegova naplavlljivost.

Tablica 6. Opis dodijeljenih oznaka i njihovih prefiksa prostorima Typhoona, njihov opis i naplavljivost

Značenje oznaka i njihovih prefiksa		Opis prostora	Naplavljivost
TORPEDO	- Torpedna soba	Habitabilan	0.92
AO	- Akustični odsjek	Habitabilan	0.96
RO	- Raketni odsjek	Habitabilan	0.96
PP	- Prostor posade	Habitabilan	0.96
MOST	- Odsjek komande(mosta)	Habitabilan	0.96
SPAS	- Kapsula za bijeg	Habitabilan	0.96
NREAKTOR	- Odsjek reaktora	Habitabilan	0.85
STROJ	- Odsjek strojarnica	Habitabilan	0.85
MEHANIKA	- Odsjek skretne mehanike	Habitabilan	0.9
NT	- Negativni tank	Balast	0.98
S	- Raketni silos	Suhi prostor	0.1
FFPRAMAC	- FF tank na pramcu	Balast	0.98
FFRO	- FF tank nad raketnim odsjekom	Balast	0.98
FFKOMP	- FF tank nad odsjekom komande	Balast	0.98
FFREAK	- FF tank nad odsjekom reaktora	Balast	0.98
FFSTROJ	- FF tank nad odsjekom strojarnice	Balast	0.98
FFKRMA	- FF tank na krmi	Balast	0.98
TG	- Tank goriva	Gorivo	0.98
STAO	- ST akustičnog odsjeka	Balast	0.97
STRO	- ST raketnog odsjeka	Balast	0.97
STPP	- ST odsjeka prostora posade	Balast	0.97
STREAK	- ST odsjeka reaktora	Balast	0.97
STSTROJ	- ST strojarnice	Balast	0.97
HTKOM	- HT komandnog odsjeka	Suhi prostor	0.96
HTS	- HT raketnih silosa	Suhi prostor	0.96
KT	- KT	Balast	0.97
MBT	- MBT	Balast	0.975

U slijedećoj tablici dan je popis svih 120 prostora koji se nalaze na Typhoonu. U tablici je također prikazan njihov volumen koji je dobiven u programu Rhino (razlika između volumena definiranih prostora u Rhino i kreiranoj ulaznoj datoteci za GHS je prosječno 1 promil što govori o dobroj transformaciji podataka iz Rhino zapisa u GHS zapis). Također, odmah je izračunato koliku masu istisnine ima svaki od tih prostora u slučaju ako ga se u proračunu smatra potpuno praznim. Svi prostori navedeni u slijedećoj tablici (Tablica 7) prikazani su 3-D prikazom (Slika 63, Slika 64, Slika 65, Slika 66). Svaka grupa u tablici je označena istom bojom kojom je označena i na 3-D prikazu.

Tablica 7. GHS oznake svih prostora na Typhoonu, njihovi volumeni i mase istisnine.

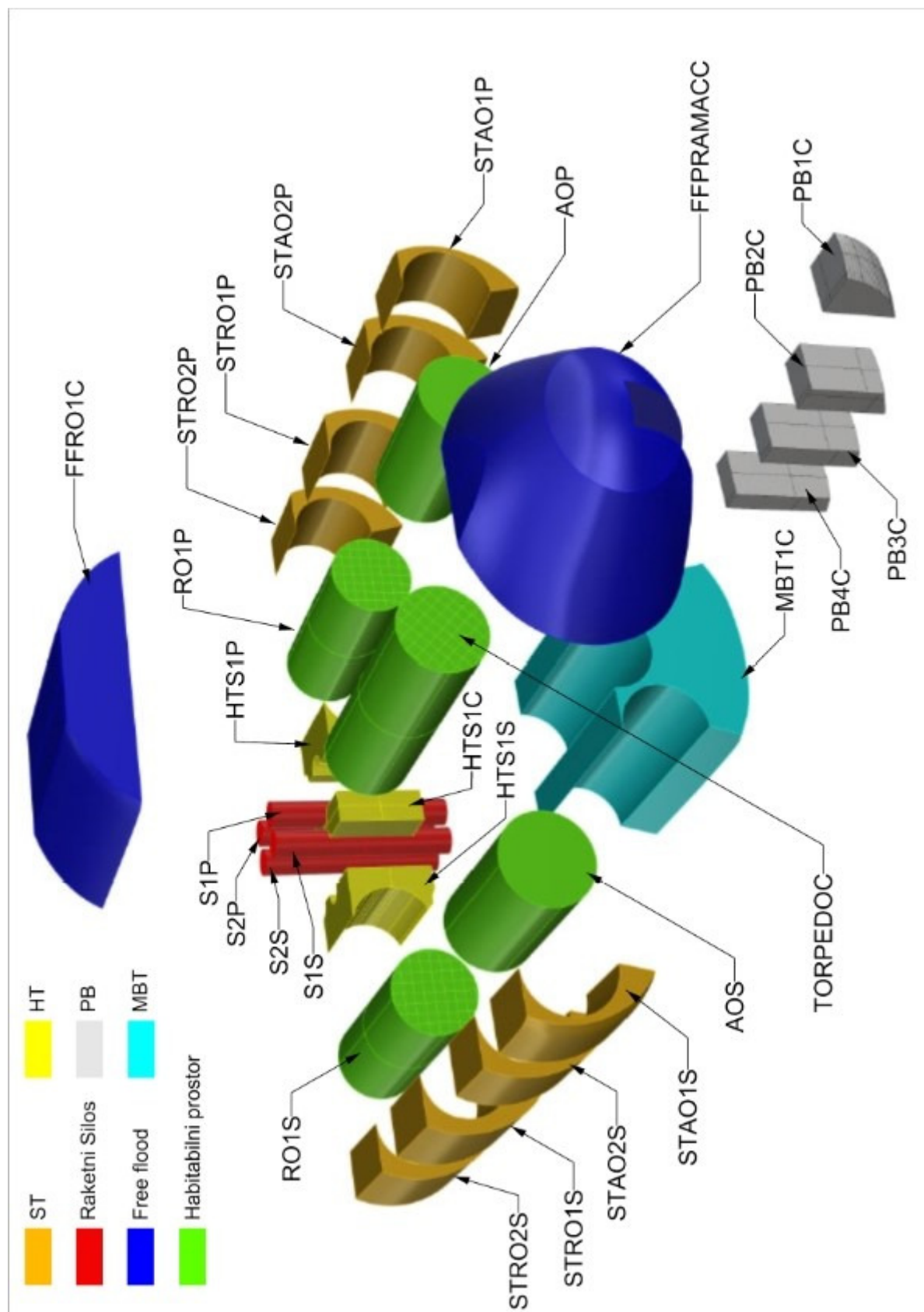
GHS oznaka	Volumeni iz Rhina [m ³]	Masa istisnine [t]	GHS oznaka	Volumeni iz Rhina [m ³]	Masa istisnine [t]
Habitabilni prostori			Sigurnosni tankovi, ST		
TORPEDOC	870.2	891.96	STAO1S	102.94	103.93
AOP	513	525.83	STAO1P	102.94	103.93
AOS	513	525.83	STAO2S	116.28	117.40
RO1P	692.65	709.97	STAO2P	116.28	117.40
RO1S	692.65	709.97	STRO1S	163.52	165.09
RO2P	692.65	709.97	STRO1P	163.52	165.09
RO2S	692.65	709.97	STRO2S	167.55	169.16
RO3P	692.65	709.97	STRO2P	167.55	169.16
RO3S	692.65	709.97	STRO3S	169.98	171.62
PP1P	946.56	970.22	STRO3P	169.98	171.62
PP1S	946.56	970.22	STRO4S	171.6	173.25
PP2P	946.56	970.22	STRO4P	171.6	173.25
PP2S	946.56	970.22	STRO5S	172.69	174.35
MOSTC	1124	1152.10	STRO5P	172.69	174.35
SPASP	70.7	72.47	STRO6S	173.41	175.08
SPASS	70.7	72.47	STRO6P	173.41	175.08
NREAKTORP	1583	1622.58	STPP1S	215.62	217.70
NREAKTORS	1583	1622.58	STPP1P	215.62	217.70
STROJP	579.15	593.63	STPP2S	216.04	218.12
STROJS	579.15	593.63	STPP2P	216.04	218.12
MEHANIAC	249.85	256.10	STPP3S	216.14	218.22
Negativni tankovi, NT			STPP3P	216.14	218.22
NT1C	295.56	298.40	STPP4P	215.9	217.98
NT2C	609.31	615.18	STPP4S	215.9	217.98
Raketni silosi, S			STREAK1P	388.91	392.65
S1P	72.38	73.08	STREAK1S	388.91	392.65
S1S	72.38	73.08	STREAK2P	373.69	377.29
S2P	72.38	73.08	STREAK2S	373.69	377.29
S2S	72.38	73.08	STSTROJ1S	160.47	162.01
S3P	72.38	73.08	STSTROJ1P	160.47	162.01
S3S	72.38	73.08	STSTROJ2S	210.03	212.05
S4P	72.38	73.08	STSTROJ2P	210.03	212.05
S4S	72.38	73.08	Tvrdi tankovi, HT		
S5P	72.38	73.08	HTKOM1C	446.63	450.93
S5S	72.38	73.08	HTKOM2C	378.02	381.66
S6P	72.38	73.08	HTKOM3C	378.02	381.66
S6S	72.38	73.08	HTKOM4C	387.85	391.58

S7P	72.38	73.08	HTBREAK1C	316.75	319.80
S7S	72.38	73.08	HTBREAK2C	263.54	266.08
S8P	72.38	73.08	HTS1P	146.33	147.74
S8S	72.38	73.08	HTS1C	136.73	138.05
S9P	72.38	73.08	HTS1S	146.33	147.74
S9S	72.38	73.08	HTS2P	120.83	121.99
S10P	72.38	73.08	HTS2C	101.08	102.05
S10S	72.38	73.08	HTS2S	120.83	121.99
Slobodno naplavljivi tankovi, FF			HTS3P	120.83	121.99
FFPRAMACC	1608.55	1624.03	HTS3C	101.08	102.05
FFRO1C	1168.06	1179.30	HTS3S	120.83	121.99
FFRO2C	3414.46	3447.32	HTS4P	120.83	121.99
FFKOMP	327.82	330.98	HTS4C	101.08	102.05
FFKOMC	2146.62	2167.28	HTS4S	120.83	121.99
FFKOMS	327.82	330.98	HTS5P	187.91	189.72
FFREAKC	1845	1862.76	HTS5C	166.67	168.27
FFSTROJS	525.5	530.56	HTS5S	187.91	189.72
FFSTROJP	525.5	530.56	Kompenzacijski tankovi, KT		
FFKRMAC	669	675.44	KTS	316.51	319.56
Tankovi goriva, TG			KTP	316.51	319.56
TG1C	462.92	396.70	Glavni balastni tankovi, MBT		
TG2C	378.59	324.43	MBT1C	1855.45	1873.31
Čvrsti balast, PB			MBT2P	671.85	678.32
PB1C	40.75	34.92	MBT2C	348.36	351.72
PB2C	41.87	35.88	MBT2S	672.25	678.72
PB3C	40.45	34.66	MBT3C	1069.99	1080.28
PB4C	41.24	35.34	MBT4C	1191.58	1203.05

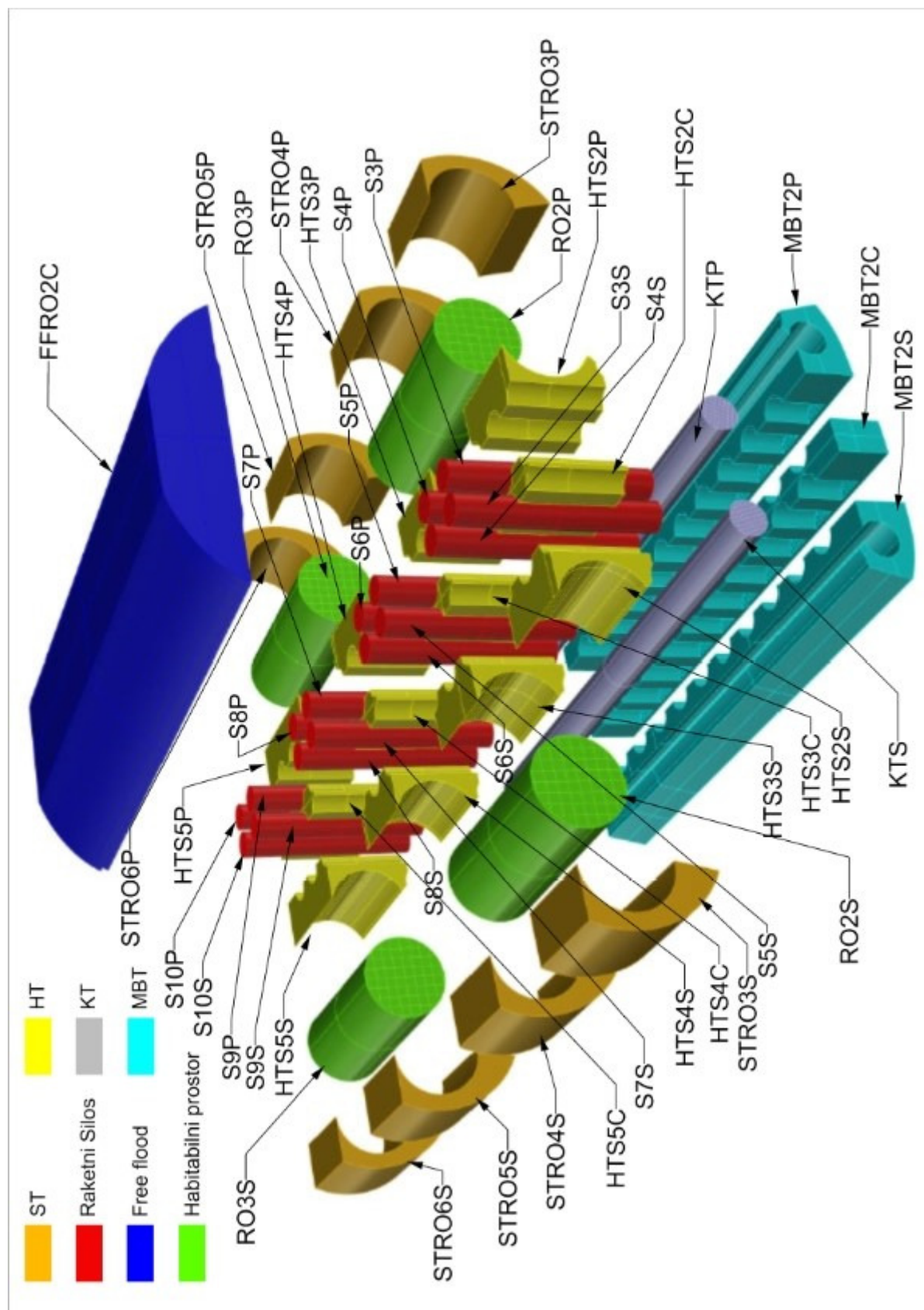
Zbroj volumena svi navedenih prostora iz tablice (Tablica 7) iznosi 48677.5 m³.

Npr., oznaka RO1P označava prostor raketnog odsjeka koji je najbliži pramcu i nalazi se s lijeve strane podmornice (s lijeve ako se gleda s krme prema pramcu).

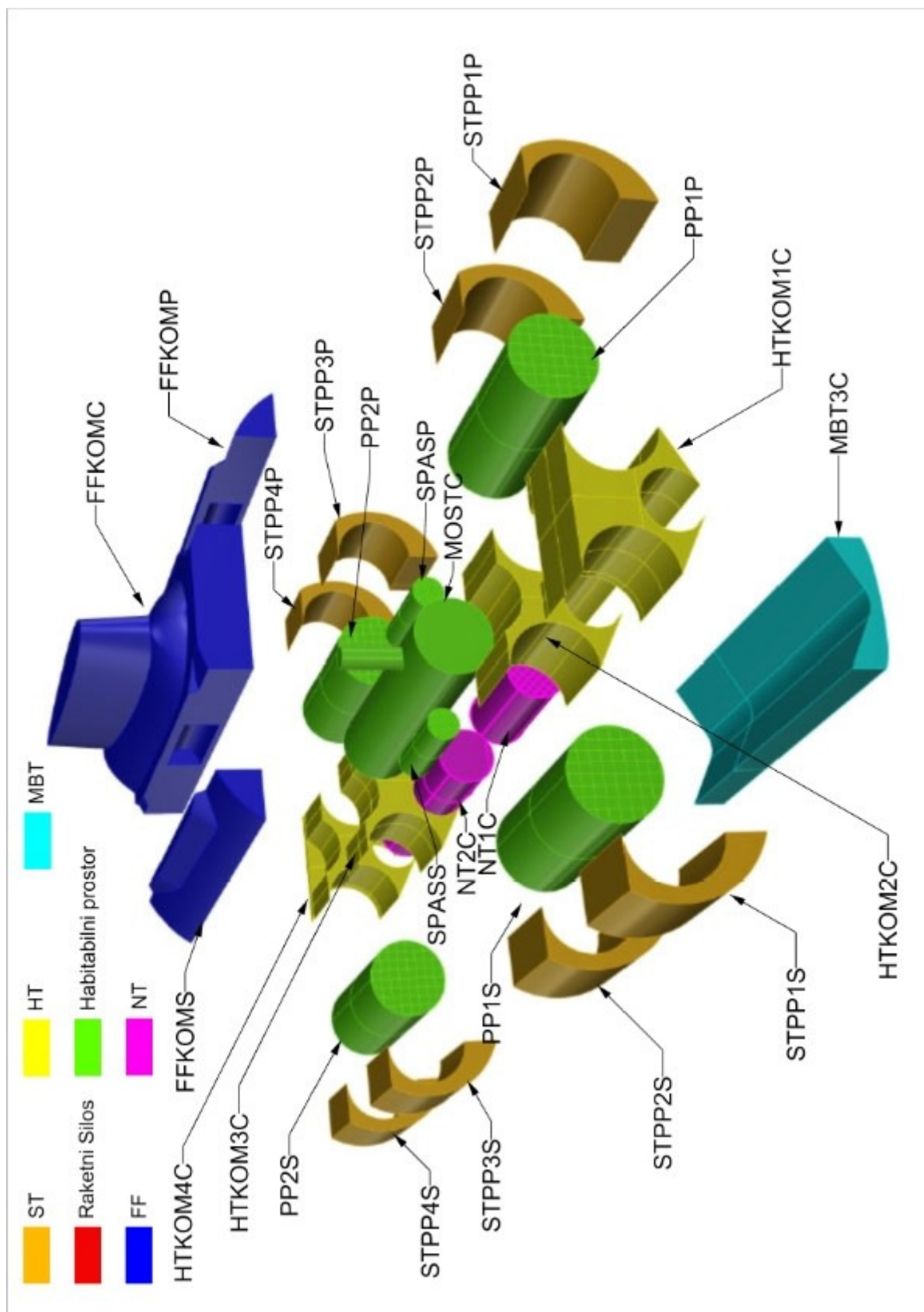
Oznaka STRO1P označava sigurnosni tank koji se nalazi u blizini raketnog odsjeka, taj balastni tank je najbliži pramcu i nalazi se s lijeve strane podmornice (ako se gleda s krme prema pramcu).



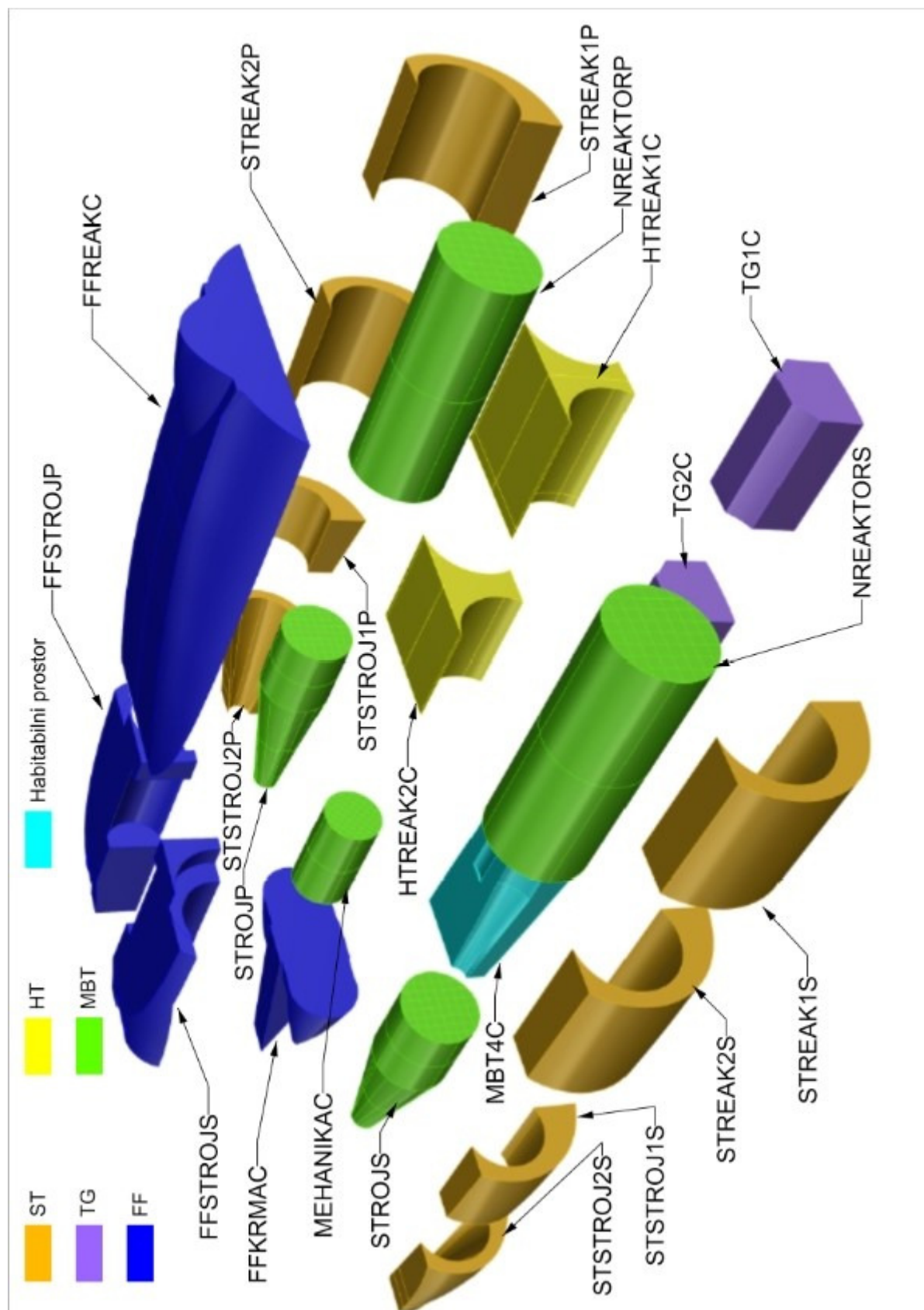
Slika 63. 3-D prikaz prostora od 134. m do 175. m Typhoon podmornice



Slika 64. 3-D prikaz prostora od 100. m do 134. m Typhoon podmornice



Slika 65. 3-D prikaz prostora od 63. m do 100. m Typhoon podmornice



Slika 66. 3-D prikaz prostora od 0. m do 63. m Typhoon podmornice

6.4. Centracija Typhoon klase podmornica ispod morske površine

Kako bi se mogle analizirati karakteristike stabiliteta Typhoona potrebno je prvo definirati težišta mase i mase istisnine.

6.4.1. Centracija masa Typhoona

Da bi se mogla provesti analiza stabiliteta Typhoona u potpuno zaronjenom stanju, potrebno je poznavati težište mase Typhoona i težište mase uzgona. No, budući da će se balastiranje, tj. naplavljivanje prostora Typhoona razmatrati metodom izgubljene istisnine, to znači da će se kroz analizu težište uzgona svaki put nanovo definirati ovisno o tome koji će se prostor smatrati naplavljenim. Sama metoda izgubljene istisnine, kao što je prikazano u poglavlju 6.2.4, diktira da se naplavljivanjem prostora težište mase sistema ne mijenja, stoga će ono biti detaljno analizirano u ovom poglavlju. Mase i težišta elemenata koji se uzimaju u obzir mogu se podijeliti u nekoliko grupa:

- a) Položaj težišta i sveukupna masa čvrstih trupova
- b) Položaj težišta i sveukupna masa lakog trupa
- c) Položaj težišta i sveukupna masa opreme i naoružanja
- d) Položaj težišta i sveukupna masa ostale strukture i opreme
- e) Položaj težišta i sveukupna masa PB-a

Podaci koji su prikazani u slijedećem tekstu dobiveni su kroz nekoliko iteracija. Naime, zbroj masa svih navednih grupa masa Typhoon podmornice mora biti jednak cjelokupnoj masi Typhoon podmornice, odnosno njihov zbroj mora biti jednak 24853 t. Prvo su analizom dobivene mase i težišta a), b) i c) grupa masa, zatim se ovisno o odnosu težištu mase i težištu mase istisne definirala masa i položaj d) i e) grupa masa. Time se je dobila masa svih sustava Typhoona čijim se oduzimanjem od stvarne mase Typhoona dobila d) grupa masa. Naravno, time se je opet dobio nepodoban odnos LCB-a i LCG-a zbog čega se je cijeli proračun morao ponoviti nekoliko puta pomoću programa Excel sve dok se nije postiglo da se položaj LCB-a i LCG-a nije poklopio jedan s drugim i dok nije dobivena sveukupna masa od 24853 t.

a) Položaj težišta i sveukupna masa čvrstih trupova

Čvrsti trupovi podijeljeni su na niz habitabilnih prostora i tankova (Slika 57). Pomoću izraza (3) moguće je dobiti masu jednog rebra (m_R) s oplatom širine jednog razmaka rebra (Slika 28). No, da bi se mogla dobiti masa cijelog jednog odsjeka potrebno je poznavati od koliko cilindara se sastoji jedan odsjek (B_C), promjere tih cilindara ($2r$), površine poprečnih presjeka rebra tih

cilindara, razmake rebara (l) cilindara, te debljinu oplata cilindara (h). Promjeri i duljine cilindara su izradom 3-D modela u Rhinu već poznati (Slika 57), dok su nepoznate površine poprečnih presjeka te razmaci rebara cilindara dobiveni istom metodom opisanom u poglavlju 4. Navedeni podaci su prikazani slijedećom tablicom (Tablica 8). Imena svakog odsjeka čvrstog trupa imenovana su prema prikazu čvrstih trupova (Slika 57).

Ubacivanjem navedenih podataka u izraz (3) dobivena je masa jednog rebra s oplatom širine jednog razmaka rebra (m_R). Rezultati su iskazani u zadnjem stupcu slijedeće tablice (Tablica 8).

Tablica 8. Podaci cilindara potrebni za dobivanje mase njihovog rebra

Odsjek	promjer cilindra, $2r$ [m]	Površina rebra, A [m ²]	razmak rebra, l [m]	debljina oplata, h [m]	masa 1 rebra s 1 razmakom rebra, m_R [t]
Torpedna soba	7.2	0.015544	0.6	0.033	3.54
Raketni odsjek	7.2	0.015544	0.6	0.033	3.54
Akustični odsjek	7.2	0.015544	0.6	0.033	3.54
Odsjek posade	8.1	0.022	0.7	0.035	5.24
Odsjek komande	7.2	0.015544	0.6	0.033	3.54
Reaktorski odsjek	9.2	0.0183	0.75	0.041	6.28
Strojarnica	7.2	0.015544	0.6	0.033	3.54
Odsjek skretne mehanike	5.6	0.0214	0.75	0.027	3.25
NT	5.6	0.0214	0.75	0.027	3.25
Raketni silosi	2.4	0.0182	0.85	0.013	0.97
KT	3	0.0132	0.8	0.016	1.08
Kapsule za bijeg	3	0.0132	0.8	0.016	1.08

Traženi rezultat u tablici (Tablica 8) je m_R . Da bi se dobile mase odsjeka potrebno je znati od koliko cilindara (B_C) se svaki odsjek sastoji (ako se isti odsjek nalazi s lijeve i desne strane Typhoona treba uračunati i cilindre koji čine i te odsjeke), te koliko je duljina svakog od tih cilindara (L_C). Umnoškom tih dviju veličina dobije se sveukupna duljina tog odsjeka (L_O). Dijeljenjem L_O -a s razmakom rebara (l) dobije se sveukupni broj rebara (B_R) potrebnih za izradu čvrstog trupa svakog odsjeka zasebno. Izraz za izračunavanje B_R -a glasi:

$$B_R = \frac{B_C \cdot L_C}{l} \quad (47)$$

U tablici (Tablica 9) je prikazan broj rebara potrebnih za izradu čvrstog trupa za svaki odsjek posebno. Taj broj nije cijeli, što fizički nije moguće, no iz razloga što nije poznata stvarna duljina svakog cilindra, te nije poznato da li se razmak rebara u stvarnosti smanjuje pri

krajevima cilindra zbog izvedbe nepropusne pregrade onda se „greška“ s neprirodnim brojem rebara smatra prihvatljivom.

Dobiveni sveukupni broj rebara (B_R) za izradu jednog odsjeka potrebno je pomnožiti s m_R čime se dobiva masa orebrenog odsjeka, ali bez mase nepropusnih pregrada (m_{NP}) koji taj odsjek pregrađuju i zatvaraju. Masa nepropusnih pregrada se računa na slijedeći način. Prvo je potrebno znati površinu pregrade što se dobije pomoću promjera cilindra. Pregrade će se smatrati dijelom onih odsjeka čiji je promjer veći od susjednog odsjeka. Npr., reaktorski odsjek se spaja sa strojarnicom i prostorom posade. Oba odsjeka su manjeg promjera od reaktorskog stoga se uzima da se obje nepropusne pregrade nalaze na reaktorskom odsjeku. Budući da postoje dva reaktorska odsjeka to znači da postoje 4 pregrade koje zatvaraju cilindar reaktora promjera 9.2 m. Odsjeci koji se ne nadovezuju na druge odsjeke (poput torpednog odsjeka) ili se samo s jedne strane nadovezuju na druge odsjeke, oni se sa tih „slobodnih strana“ zatvaraju kalotama. Kalote se doimaju kao da su ljevene i velike debljine (Slika 14) stoga se smatra da je njihova debljina ekvivalentna umnošku debljine oplata cilindra kojeg kalota zatvara s faktorom 2. Kako za pregrade nije poznato od kakve su strukture izrađene (rebra i ukrepe) onda se njihova masa aproksimira tako da se debljina opločenja računa jednako kao i debljina kalote. Budući da je način računanja mase kalote i pregrade identičan onda se oni mogu smatrati istima, tj. prilikom proračuna nije ih potrebno razlikovati već ih se može zbrajati. Broj kalota, tj. pregrada (B_{NP}) se utvrđuje pomoću prikaza odsjeka Typhoona (Slika 57).

Pregrada i kalota na strojarnici se razmatraju kao poseban slučaj budući da na jednom njezinom kraju prolazi vratilni vod, zbog čega je kalota smanjena, a drugi kraj je povezan s reaktorskim odsjekom koji već sadrži nepropusnu pregradu. Zbog toga u proračunu mase odsjeka nije uzeta nijedna nepropusna pregrada ili kalota. Malo mase što kalota može imati prolaskom vratila kroz nju anulirano je tako da se računanje mase konstrukcije strojarnice izvršilo tako kao da je promjer cilindra strojarnice konstantan po cijeloj svojoj duljini dok on to u stvarnosti nije, već je stožast.

Masa jedne pregrade odsjeka računa se prema slijedećem izrazu:

$$m_{NP} = \frac{(2r)^2 \cdot \pi}{4} \cdot h \cdot 2 \quad (48)$$

Masa cijelog jednog odsjeka dobiva se iz slijedeće jednadžbe:

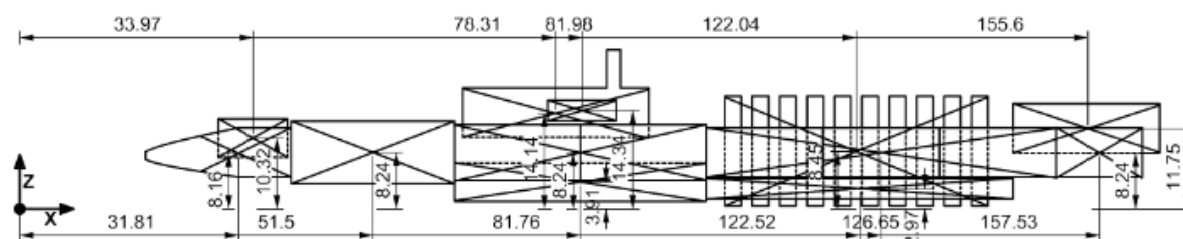
$$m_O = (m_R \cdot B_R) + (m_{NP} \cdot B_{NP}) \quad (49)$$

Navedeni podaci i rezultati prikazani su u sljedećoj tablici (Tablica 9).

Tablica 9. Podaci potrebni za dobivanje masa svih odsjeka Typhoona

Odsjek	Broj cilindara, B_c	duljina cilindra, L_c [m]	sveukupni broj rebara, B_R	masa nepropusne pregrade, m_{NP} [t]	broj pregrada, B_{NP}	Sveukupna masa odsjeka, m_o [t]
Torpedna soba	1	21.4	35.67	2.69	2	131.69
Raketni odsjek	6	17	170.00	2.69	4	612.82
Akustični odsjek	2	12.6	42.00	2.69	4	159.50
Odsjek posade	4	18.4	105.14	3.61	4	565.58
Komanda	1	27.2	45.33	2.69	2	165.93
Reaktorski odsjek	2	23.8	63.47	5.45	4	420.39
Strojarnica	2	21.3	71.00	2.69	0	251.45
Odsjek skretne mehanike	1	10.1	13.47	1.33	2	46.37
NT	1	36.8	49.07	1.33	2	161.93
Raketni silosi	20	17	400.00	0.12	40	395.50
KT	1	44.8	56.00	0.23	4	61.70
Kapsule za bijeg	2	10	25.00	0.23	4	28.04
					$\Sigma=$	3000.92

Kada su poznate mase pojedinih odsjeka potrebno je odrediti njihova težišta kako bi se moglo dobiti njihovo sveukupno težište. Težište svakog odsjeka se određuje grafički pomoću sljedećeg crteža (Slika 67).



Slika 67. Težišta odsjeka Typhoona

Na slici su označene koordinate težišta masa svih odsjeka Typhoona. Težišta su definirana po X i Z osi dok se po Y osi smatra da su sva težišta u nuli zbog simetričnosti trupa. Smatra se da je konstrukcija cilindara jednoliko raspoređena čime je jednoliko raspoređena i njihova masa. Zbog toga su težišta masa odsjeka određena kao težišta njihovih volumena. Tim principom se jedino ne mogu odrediti težišta odsjeka prostora posade zato što na njemu postoje 2 nepropusne pregrade, jedna između dvaju cilindara i druga između prostora posade i raketnog odsjeka, zbog čega je po X osi dislocirano težište mase odsjeka prostora posade. Na slici (Slika 67) je očitano

težište odsjeka bez pregrada na koordinati $X=81.76$ m, no kada se uzmu u obzir mase pregrada zajedničko težište odsjeka prostora posade po X osi pomiče se na $X=82.23$ m. Prikaz svih masa odsjeka i njihovih težišta, te konačno težište svih odsjeka prikazana je slijedećom tablicom (Tablica 10).

Tablica 10. Težišta konstrukcije čvrstih trupova

Odsjek	m_o [t]	X [m]	$X m_o$ [tm]	Z [m]	$Z m_o$ [tm]
Torpedna soba	131.69	155.6	20491.293	11.75	1547.382
Raketni odsjek	612.82	125.65	77001.328	8.24	5049.669
Akustični odsjek	159.50	157.53	25125.524	8.24	1314.253
Odsjek posade	565.58	82.23	46510.102	8.24	4660.382
Komanda	165.93	78.31	12993.803	14.14	2346.219
Reaktorski odsjek	420.39	51.5	21650.286	8.24	3464.046
Strojarnica	251.45	31.81	7998.7811	8.16	2051.872
Odsjek skretne mehanike	46.37	33.97	1575.3134	10.32	478.5762
NT	161.93	81.76	13239.677	3.91	633.1597
Raketni silosi	395.50	122.04	48266.989	8.45	3341.987
KT	61.70	122.52	7558.9143	2.97	183.2352
Kapsule za bijeg	28.04	81.98	2299.0001	14.34	402.1427
$\Sigma m_o =$	3000.92	$\Sigma X \cdot m_o =$	284711.01	$\Sigma Z \cdot m_o =$	25472.92

Konačno, koordinate težišta čvrstih trupova dobivaju se preko slijedećih izraza :

$$X_o = \frac{\Sigma X \cdot m_o}{\Sigma m_o} = 94.87 \text{ m} \quad (50)$$

$$Y_o = \frac{\Sigma Y \cdot m_o}{\Sigma m_o} = 8.49 \text{ m} \quad (51)$$

b) Položaj težišta i masa lakog trupa

Da bi se mogla odrediti masa lakog trupa potrebno je poznavati materijal izrade, srednju debljinu oplata, površinu oplata lakog trupa, te je potrebno poznavati poprečnu površinu rebra od kojeg je struktura lakog trupa izrađena. Kako nijedan od navedenih podataka nije poznat, ti podaci su aproksimirani.

Pretpostavka je da je laki trup izrađen od HY-80, dok se za srednju debljinu oplata lakog trupa pretpostavlja da iznosi 25 mm.

U programu Rhinu se na temelju izrađenog modela lakog trupa lako dobiva podatak o veličini njegove površine. Površina lakog trupa iznosi 12154 m^2 . Umnožak površine lakog trupa s

debljinom oplata i gustoćom čelika (Tablica 2) daje masu lakog trupa oplata (m_{OLT}) koja iznosi 2123 tone.

Dimenzije rebra lakog trupa preuzete su iz rezultata optimizacije konstrukcije cilindra promjera 8.1 m izračunatim u poglavlju 4.4.7. (Tablica 3). Rezultat te optimizacije je razmak rebara od 0.65 m te površina poprečnog presjeka rebra od 0.01655 m^2 . Opseg lakog trupa na paralelnom srednjaku Tyhoona iznosi 60 m. Umnožak opsega s površinom poprečnog presjeka rebra daje volumen koji iznosi 0.993 m^3 . Duljina Typhoona od 175 m podijeljena s razmakom rebara lakog trupa dobiva se 269 rebara. Volumen rebara pomnožen s brojem rebara te gustoćom HY-80 (Tablica 2) daje masu rebara lakog trupa (m_{RLT}) od 2098 tona.

Konačno, masa lakog trupa iznosi:

$$m_{LT} = m_{OLT} + m_{RLT} = 2123 + 2038 = 4222 \text{ t} \quad (52)$$

Težište mase lakog trupa odredilo se pomoću Rhina, tj. grafički. Rhino ima mogućnost određivanja težišta volumena i površina. Smatra se da je struktura lakog trupa jednoliko raspoređena njegovom duljim stoga, gdje je težište volumena lakog trupa tu je i težište mase lakog trupa. Dobiveni LCG trupa je na 95 metara njegove duljine no, treba imati na umu da je trup podmornice ojačan na pramcu i nadgrađu kako bi mogao probijati led stoga je procijenjen da je LCG lakog trupa bliže pramcu. Kočni LCG i VCG lakog trupa su slijedeći:

$$X_{LT} = 100 \text{ m} \quad Y_{LT} = 8.63 \text{ m}$$

c) Položaj težišta i sveukupna masa opreme i naoružanja

Mase opreme i naoružanja navedeni su u poglavlju 5.2. i 5.3, no nisu definirani svi potrebni detalji kako bi se mogla napraviti centracija mase opreme i naoružanja. Pozicije težišta po X i Z osi su procijenjena te su prikazana na slici (Slika 68).

Torpeda i torpedna soba

Navedeno je da Typhoon obično nosi 22 torpeda, no ne navodi se koliko koje vrste torpeda nosi. Stoga da bi se procijenila masa nošenih torpeda, zbrojila se je masa svih navedenih torpeda (poglavlje 5.3.2). Dobivena masa svih vrsta torpeda se zatim podijelila s brojem vrsta torpeda čime je dobivena srednja masa torpeda koja iznosi 2.375 t. Budući da Typhoon nosi do 22 torpeda to znači da sveukupna masa nošenih torpeda iznosi 52.25 t. Treba također

pribrojiti masu lansirnog sustava čime se masa torpeda i lansirnog sustava može pretpostaviti na 70 t.

Tank goriva

Prema definiranom smještaju tankova goriva (Slika 61) dobiven je volumen tankova goriva koji iznosi 841 m^3 . U tankove se ukrcava dizel gorivo gustoće 0.87 t/m^3 što čini masu goriva od 732 t. Procijenjeno težište prikazano je na slijedećoj slici (Slika 68).

Balističke rakete

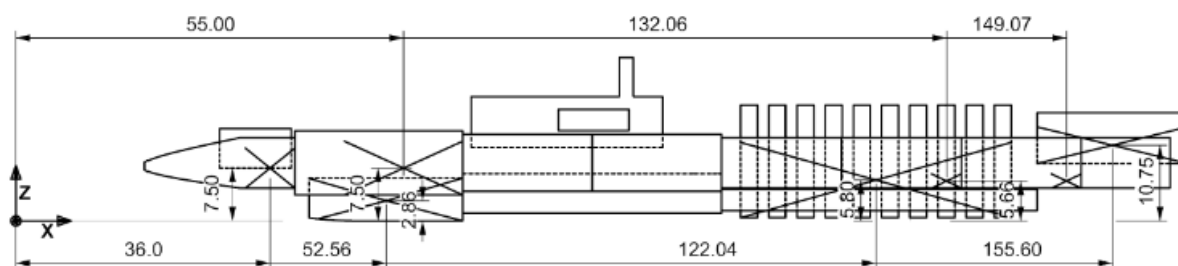
Masa i težište mase silosa je već određeno, potrebno je odrediti masu i težište samih R-39 raketa. Kako je opisano u poglavlju 5.3.1 masa raketa iznosi 87.6 t čiji veći dio sačinjavaju spremnici goriva, zbog čega se zaključuje da se težište raketa nalazi na jednoj trećini njihove visine, odnosno na 5.33 m. Budući da rakete nisu oslonjene na oplatu podmornice već na čvrstu konstrukciju težišta raketa smještenih na Typhoon klase podmornica po Z osi, procjenjuje se na 5.8 m (Slika 68).

Strojarnica i nuklearni reaktor

Zbog velike mase reaktora i strojarnice pretpostavka je da su zbog uzdužnog stabiliteta smješteni što je više moguće prema pramcu. Pretpostavljene pozicije težišta LCG-a i VCG-a prikazane su na slici (Slika 53).

Baterije

Pretpostavljeni položaj i masa baterija opisani su u poglavlju 5.2.3. Točan položaj težišta prikazan je na slici (Slika 68). Proračun centracije izvršen je pomoću izraza (50) i (51), a rezultati centracije su prikazani tablicom (Tablica 11).



Slika 68. Prikaz težišta opreme i naoružanja

Tablica 11. Mase i težišta opreme i naoružanja

	X [m]	Z [m]	m [t]	X·m [tm]	Z·m [tm]
Reaktor	55	7.5	3794	201740	27510
R-39 rakete	122.04	5.8	1752	213814.1	10161.6
Strojarnica	36	7.5	3906	140616	29295
Baterije 1	132.06	5.66	300	39618	1698
Baterije 2	149.07	5.66	300	44721	1698
Torpedna soba	158	10.75	100	15800	1075
Tankovi goriva	52.56	2.86	732	38473.92	2093.52
			10758	694783	73531.12

$X_{ON} = 64.58 \text{ m}$	$Z_{ON} = 6.84 \text{ m}$
----------------------------	---------------------------

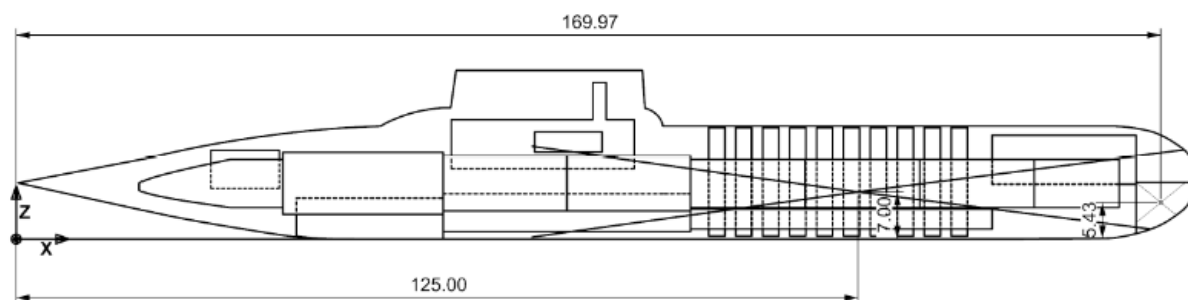
d) Položaj težišta i sveukupna masa ostale strukture i opreme

U ovoj grupi masa razmatraju se sve nepoznate mase i njihova težišta koje nisu uzete u obzir dosadašnjom analizom (pregrade balastnih tankova, ostala oprema itd.). Kako su mase i položaj težišta masa strojarnice i reaktora detaljno analizirani smatra se da se najveći dio nepoznate mase opreme i strukture nalazi od odsjeka prostora posade do pramca Typhoona. Analizom svih masa, i na kraju oduzimanjem od sveukupne mase Typhoon podmornice svih grupa masa, dobiveno je da masa ostale opreme i konstrukcije iznosi 5014.23 t a težište je prikazano na slici (Slika 69).

$$X_{SO} = 125 \text{ m} \quad Y_{SO} = 7 \text{ m}$$

e) Položaj težišta i sveukupna masa PB-a

Analizom je ustanovljeno da je potrebno postaviti 1857.76 t PB-a na pramcu da bi se ostvario što veći krak kako bi se LCG našao ispod LCB-a. Koordinate težišta mase PB-a označene su na slici (Slika 68). Smatra se da je PB uzdužno podijeljen na 4 dijela jednakih masa. Tijekom analize stabiliteta u oštećenom stanju neki od tih dijelova će se smatrati odbačenim ako će to biti potrebno. U GHS-u taj će se prostor smatrati tankom koji je 100% ispunjen tekućinom gustoće olova, tj. 11.34 t/m^3 . Također je potrebno napomenuti da je u proračunu LCB-a uzeta u obzir masa istisnine koju stvara PB.



Slika 69. Prikaz težišta nepoznatih masa i PB-a

Prikaz svih masa, njihovih težišta te proračun težišta LCG-a

U tablici (Tablica 12) su prikazana sveukupna mase te težišta svih skupina masa Typhoona. Konačna koordinata LCG-a izračunata je korištenjem izraza (50)(51).

Tablica 12. Prikaz svih masa i njihov težišta te izračun sveukupnog težišta mase Typhoona

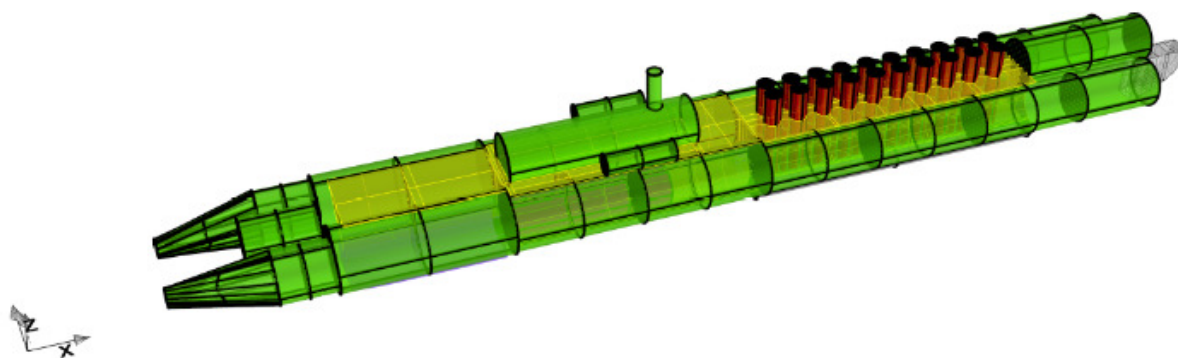
	m	X	X·m	Z	Z·m
Oprema i naoružanje	10758.00	64.58	694783.0	6.84	73531.12
Konstrukcija lakog trupa	4222.09	100.00	422209.2	8.63	36436.66
Konstrukcija habitabilnih dijelova	3000.92	94.87	284711.0	8.49	25472.92
ostala oprema i konstrukcija	5014.23	125.00	626778.7	7.00	35099.61
Stalni balast	1857.761	169.92	315670.7	5.43	10087.64
	$\Sigma m =$ 24853.00		$\Sigma X \cdot m =$ 2344152.70		$\Sigma Z \cdot m =$ 180627.95
LCG= 94.321 m		VCG= 7.26 m			

6.4.2. Centracija mase istisnine Typhoona

Prostori koji sudjeluju u uzgonu u neoštećenom stanju su slijedeći :

- Trajni balast, PB: PB1C, PB2C, PB3C, PB4C
- Habitabilni prostori: TORPEDOC, AOP, AOS, RO1P, RO1S, RO2P, RO2S, RO3P, RO3S, PP1P, PP1S, PP2P, PP2S, MOSTC, SPASP, SPASS, NREAKTORP, NREAKTORS, STROJP, STROJS, MEHANIAC,
- Tvrdi tankovi, HT: HTKOM1C, HTKOM2C, HTKOM3C, HTKOM4C, HTREAK1C, HTREAK2C, HTS1P, HTS1C, HTS1S, HTS2P, HTS2C, HTS2S, HTS3P, HTS3C, HTS3S, HTS4P, HTS4C, HTS4S, HTS5P, HTS5C, HTS5S
- Kompenzacijski tankovi, KT: KTS, KTP
- Tankovi goriva, TG: TG1C, TG2C,
- Negativni tankovi, NT: NT2C
- Raketni silosi, S: S1P, S1S, S2P, S2S, S3P, S3S, S4P, S4S, S5P, S5S, S6P, S6S, S7P, S7S, S8P, S8S, S9P, S9S, S10P, S10S

Svi nabrojeni prostori prikazani su na slijedećoj slici (Slika 70):



Slika 70. Prostori koji sudjeluju u uzgonu

Detaljni prikaz i popis navedenih tankova i prostora dan je u poglavlju 6.3.4 (Slika 63, Slika 64, Slika 65, Slika 66,).

Navedeni prostori čine masu istisnine od 23544.51 t. Težište njihove istisnine je dobiveno u Rhinu i ono se nalazi po X osi na 94.117 m, a po Z osi se nalazi na 8.23 m.

Također, u masu istisnine treba uračunati i masu istisnine koju daje volumen same konstrukcije koja se u cijelosti nalazi u moru (debljina limova lakog trupa, rebra lakog trupa i ST-ova itd.). Iteracijom je dobiveno da volumen te konstrukcije iznosi 702.32 m³ dok se težište tog volumena procjenjuje po X osi na 101.163 m i po Z osi na 8.5 m. Prikaz poznatih iznosa masa istisnina i njihova težišta, te izračun zajedničkog težišta mase istisnine prikazan je slijedećom tablicom (Tablica 13).

Tablica 13. Konačan izračun težišta mase isitisnine Typhoon podmornice

	U [t]	X [m]	X·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
težište istisnine odsjeka	24133.12	94.117	2271337	8.23	198543.2
težište konstrukcije	719.88	101.163	72824.95	8.50	6118.957
$\Sigma U =$	24853.00	$\Sigma X \cdot U =$	2344162	$\Sigma Z \cdot U =$	204662.2
	LCB =	94.321	VCB =	8.23	

Usporedba težišta uzgona i mase podmornice (Tablica 12, Tablica 13) je zadovoljavajuća. LCG se nalazi ispod LCB-a , bez ikakve razlike u uzdužnom pogledu. Razlika između VCG-a i VCB-a iznosi skoro 1 metar što je više nego dovoljno. Naime, da bi se bolje razmotrilo rezultate oni su se usporedili s zahtjevima ABS za podmornice [51]. Minimalni zahtjevi ABS-a su slijedeći: LCG se mora nalaziti ispod LCB-a, a pri tome njihova udaljenost između VCB-a i VCG-a ne smije biti manja od 51 mm ili od udaljenosti dobivene slijedećim izrazom (u obzir se uzima ona udaljenost koja je veća):

$$GB_{min} = \frac{n \cdot w \cdot N \cdot d}{W \cdot t g \alpha} \quad (53)$$

Gdje su:

$n = 0.1$ (predstavlja 10% posade koja se istovremeno kreće)

$w = 79.5$ kg (masa svakog člana posade)

d = najveća duljina čvrstog trupa unutar kojeg posada ima pristup (mm)

N = sveukupni broj članova posade

W = masa podmornice (kg)

$\alpha = 25^\circ$ (najveći sigurni trim)

Konačno, rješenje izraza (53) je slijedeće:

$$GB_{min} = \frac{0.1 \cdot 79.5 \cdot 163 \cdot 146460}{24853000 \cdot t g 25} = 16.38 \text{ mm}$$

Udaljenost između VCG-a i VCB-a mora iznositi minimalno 51 mm što je ostvareno. Također, pravila nalažu da se u nijednom slučaju ne smije dogoditi da se VCB dođe ispod VCG-a.

6.5. Centracija Typhoon klase podmornica na morskoj površini

Kako bi se rezultati proračuna stabiliteta Typhoon podmornice u oštećenom stanju na površini mogli bolje razumjeti potrebno ih je usporediti s stabilitetom Typhoona u neoštećenom stanju na površini. Kako je već rečeno Typhoon uobičajeno plovi na gazu od 11.5 m pri čemu su mu vijci potpuno uronjeni. No, također je rečeno da Typhoon može pražnjenjem balastnih tankova smanjiti gaz na 9 m. Za potrebe usporedbe rezultata analize oštećenih stanja na površini s neoštećenim stanjem na površini koristi će se karakteristike stabiliteta na gazu od 9 m. Rezultati dobiveni u programu GHS za neoštećeno stanje na površini pri gazu od 9 m prikazani su slijedećom slikom (Slika 71).

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 9.068 @ Origin							
Trim: Aft 0.13 deg., Heel: Stbd 0.07 deg.							
Part-----			Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	RefHt
PB1C	1.000	11.340	454.42	173.138f	0.042s	6.447	
PB2C	1.000	11.340	467.12	170.692f	0.044s	5.500	
PB3C	1.000	11.340	451.34	168.790f	0.044s	5.044	
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759	
Total Tanks----->			1,833.15	169.928f	0.043s	5.437	
Total Weight----->			24,828.39	94.247f	0.003s	7.270	
			Displ (MT)----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	
TRUP		1.025	26,255.81	94.542f	0.007s	5.105	-9.068
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-785.80	167.341f	0.036s	5.663	-9.068
FFRO1C	Flooded	1.025	0.00				
FFRO2C	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMC	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMS	Flooded	1.025	0.00				
FFREAKC	Flooded	1.025	0.00				
FFSTROJS	Flooded	1.025	-77.48	26.952f	2.035s	8.350	-9.068
FFSTROJP	Flooded	1.025	-77.21	26.964f	2.055p	8.347	-9.068
FFKRMAC	Flooded	1.025	-486.62	13.798f	0.029s	7.362	-9.068
Total Displacement-->	1.025		24,828.69	94.242f	0.006s	5.023	

Righting Arms:				0.000	0.000		
Distances in METERS.-----							

Slika 71. Rezultati proračuna stabilитета neoštećene Typhoon podmornice na morskoj površini

6.6. Stabilitet Typhoona u oštećenom stanju na površini i ispod nje

Kao što je rečeno, analiza stabiliteta Typhoon podmornice u oštećenom stanju provesti će se metodom izgubljene istisnine, no također na pramcu je postavljen čvrsti balast koji se može odbaciti u slučaju ako se pokaže da je to potrebno. Zato se u slučaju odbacivanja PB-a ne može smatrati da je težište mase na položaju koji je ustvrđen u poglavlju 6.4.2. zbog čega je u svakom proračunu odvojena masa i težište cijele Typhoon podmornice (u tablici označeno s: „masa Typhoona“) od težišta i masa sva četiri PB-a.

Također naplavljivanjem i pražnjenjem prostora Typhoon podmornice mijenja se ukupni volumen koji sudjeluju u uzgonu te njegovo težište. No, težište i volumen istisnine koju uzrokuje struktura se ne mijenja stoga se ono dodatno uzima u obzir prilikom računanja zajedničkog volumena i težišta uzgona Typhoon podmornice.

Prilikom računanja stabiliteta oštećenog stanja Typhoon podmornice u zaronjenom stanju proračun je izvršen pomoću programa Rhino i Excel. Volumen i težište svih prostora koji sudjeluju u uzgonu dobiven je pomoću programa Rhino. Dobiveni volumen ubačen je u

program Excel gdje je pomnožen s gustoćom mora čime se je dobila masa istisnine (u tablici označeno s „svi prostori“). U proračun je, kako je navedeno, još uzet u obzir volumen tj. masa istisnine i njegovo težište kojeg uzrokuje konstrukcija Typhoon podmornice (u tablici označeno s „konstrukcija“). Zajednički iznos i težište mase istisnine dobiven je pomoću izraza (50) i (51). Treba napomenuti da je ovom metodom proračuna (kombinacija programa Rhino i Excel) nemoguće postići da se iznos mase Typhoon podmornice i mase istisnine točno podudaraju kako bi se postiglo ravnotežno stanje u zaronjenom stanju, zato se razlika u masi istisnine i masi Typhoon podmornice do 100 tona smatra prihvatljivom. Naime, ta razlika je premalena da bi uzrokovala neke veće pomake u težištu mase istisnine, a istovremeno nije dovoljno velika da ju se prilikom vožnje ispod morske površine ne može regulirati dinamičkim putem pomoću hidroplana. Također, ovom metodom proračuna zanemareni su faktori naplavljenosti zbog nemogućnosti samih programa da ih uzmu u obzir. To znači da je u analizi uzeto da su svi promatrani prostori naplavljeni 100% što je u realnosti nemoguće. To se može shvatiti i kao svojevrsnom sigurnošću kojom sa svakim naplavljivanjem zanemaruje postotak volumena koji u realnosti sudjeluje u uzgonu prilikom čega je masa istisnine u stvarnosti veća od izračunate što povećava mogućnost preživljavanja Typhoon klase podmornica. Prilikom analize stabiliteta oštećenog stanja Typhoon podmornice u zaronjenom stanju odmah je dan krajnji rezultat, tj. nakon što su definirani naplavljeni prostori odmah je dan prijedlog prostora koje treba naplaviti ili isprazniti kako bi se postigao što manji trim (u rezultatima označeno s Ψ) i poprečni nagib (u rezultatima označeno s φ). Svi prostori koji sudjeluju u uzgonu u neoštećenom stanju navedeni su u poglavlju 6.4.2 te se na osnovi toga sve te prostore smatra ne naplavljenim osim ako se prilikom analize stabiliteta ne ustvrdi da je neke od tih prostora, odnosno balastnih tankova, potrebno naplaviti što je posebno napomenuto. Također, svi ostali prostori koji nisu navedeni kao prostori koji sudjeluju u uzgonu smatraju se ispunjenima morem. Ako je utvrđeno analizom da je neke od tih prostora potrebno isprazniti to je također napomenuto. Također treba voditi računa koje tankove se može i koje se ne može isprazniti u zaronjenom stanju i na morskoj površini kako je opisano u poglavlju 6.3.3.

Na temelju definiranih oštećenja Typhoon podmornice u zaronjenom stanju provedena je i analiza stabiliteta Typhoon podmornice na morskoj površini za ta ista oštećenja. Ta analiza provedena je u programu GHS u kojem je omogućen proračun s faktorima naplavljenosti.

U rezultatima su prikazane slijedeće vrijednosti:

- Razlike između masa istisnine i mase Typhoon podmornice – kako je već definirano, može se kretati u iznosima između -100 i 100 t te ako je iznos negativan to znači da je masa istisnine manja od mase podmornice i obrnuto
- Horizontalna udaljenost između LCB-a i LCG-a iskazana je kao razlika. Ako je razlika pozitivna to znači da se LCB nalazi ispred LCG-a i obrnuto
- Poprečna udaljenost između poprečnog težišta uzgona po Y osi (engl. transverse center of bouyancy, u daljnjem tekstu TCB) TCB-a i poprečnog težišta mase po Y osi (engl. transverse center of gravity, u daljnjem tekstu TCG) TCG-a dobivena je kao razlika između TCB-a i TCG-a. Ako je razlika pozitivna to znači da se TCB nalazi ispred lijevo od simetrale i obrnuto
- Vertikalna udaljenost između VCB-a i VCG-a iskazana je kao njihova razlika. Ta razlika uvijek mora biti pozitivna jer se u protivnome ne bi ispunio zahtjev stabiliteta težina tj. da se B uvijek nalazi iznad G što je također i zahtjev ABS-a.

Iz dobivenih razlika mogu se dobiti kutevi trima i nagiba prema slijedećem crtežu (Slika 72) i izrazima.

Trim se prema crtežu računa prema slijedećem izrazu:

$$\Psi = \arctg\left(\frac{LCB-LCG}{VCB-VCG}\right) \quad (54)$$

Ako je trim pozitivan to znači da je podmornica u zatezi, ako je negativan onda je u pretezi.

Nagib se prema crtežu računa prema slijedećem izrazu:

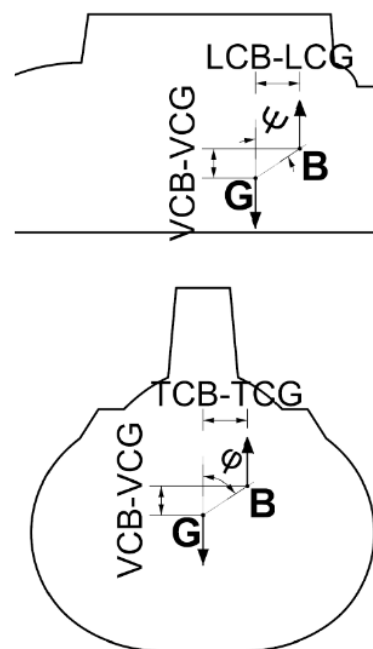
$$\varphi = \arctg\left(\frac{TCB-TCG}{VCB-VCG}\right) \quad (55)$$

Ako je nagib pozitivan to znači da je podmornica, gledajući s njezine krme, rotirala oko uzdužne osi u smjeru kazaljke na satu i obrnuto

Prema ABS-u kutevi trima do 25° se smatraju sigurnima i

taj će se trim pokušati ostvariti u svim situacijama. O nagibu nema podataka stoga će se uzeti iznos do 25° i on će se pokušati ostvariti.

Nakon što je analiziran stabilitet podmornice u zaronjenom stanju, analiziran je stabilitet za isto to oštećenje na morskoj površini ali pomoću programa GHS. Prilikom računanja trima i nagiba u programu GHS smatra se da su svi prostori prazni, stoga su prostori koji se smatraju oštećenima gledaju kao naplavljenima (engl. flooded kako je prikazano u rezultatima).



Slika 72. Prikaz računanja trima i nagiba

Također, kako je opisano u poglavlju 6.2.3, razina vode u balastnim tankovima se regulira tlakom zraka što znači da se i svi balastni tankovima mogu smatrati naplavljenima jer bi u protivnom tlak zraka unutar tanka trebao biti negativan (podtlak) kako bi razina vode u tanku bila iznad vodne linije što u stvarnosti vjerojatno nije izvedeno (izvedba dodatnih uređaja). Analizom trima i nagiba Typhoon podmornice na površini za razmatrana oštećena stanja željelo se je utvrditi da li je nakon oštećenja podmornica u stanju sama ploviti ili joj je potrebna pomoć. To se je pokušalo utvrditi pomoću dobrih trimova i nagiba.

6.6.1. Analiza oštećenja 1

U oštećenju 1 simulirao se udar torpeda u desnu stranu Typhoon podmornice gledano od krme prema pramcu. Točnije, smatra se da se je udar desio na 32 m pod duljini podmornice prilikom čega su se oštetili habitabilni volumeni od 18. m do 63. m. U razmatranje je uzeta tako velika šteta kako bi se dobio što bolji uvid o podvodnom stabilitetu Typhoona. Naime, proboj trupa na krmi je velika opasnost za Typhoon podmornicu zbog mogućnosti gubitka pogona ali zbog značajno gubitka stabiliteta iz razloga što se takvim probojem gubi uzgon u krmi gdje se nalaze najveće mase (reaktor i strojarnica). Smatra se da su oštećeni i potpuno naplavljeni habitabilni prostori STROJS, NREAKTORS, HTREAK2C, MEHNIKAC prilikom čega volumen oštećenja iznosi 2675.5 m³. Oštećenima se također smatraju i ST tankovi STREAK1S, STREAK2S, STSTROJ1S, STSTROJ2S.

Tablica 14. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 1

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	20868.97	21390.69	100.40	2147625.70	0.63	13411.97	8.18	174975.88
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	22110.57	ΣX·U=	2220450.648	ΣY·U=	13411.97	ΣZ·U=	181094.84
		LCB=	100.42	TCB=	0.61	VCB=	8.19	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	461.94	172.40	79638.46	6.45	2977.20			
PB2	470.94	170.00	80059.80	5.50	2588.76			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	24853.00	ΣX·D=	2344162.12	ΣZ·D=	180768.30		
		LCG=	94.32	VCG=	7.27			
Rezultati								
U-D=		-2742.43	t					
LCB - LCG =		6.1037	m =>ψ =	81.46	°			
TCB - TCG =		0.6066	m => φ =	33.49	°			
VCB - VCG =		0.9169	m					

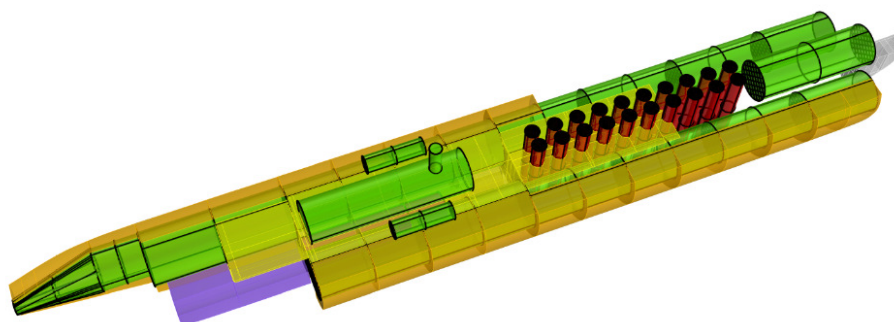
Nakon navedenog oštećenja slijedeći prostori se moraju poplaviti odnosno ispumpati kako bi Typhoon podmornica imala što ravniji trim, odnosno nagib

Napuniti se moraju: KTP, HTS1P, HTS1C, HTS1S, HTS2P, HTS2C, HTS2S, HTS3P, HTS3C, HTS3S.

Isprazniti se moraju: STAO1S, STAO2S, STRO1S, STRO2S, STRO3S, STRO4S, STRO5S, STRO6S, STPP1S, STPP2S, STPP3S, STPP4S, STPP1P, STPP2P, STPP3P, STPP4P, STREAK1P, STREAK2P, STSTROJ1P, STSTROJ2P.

Tablica 15. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 1 1/2

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	23536.05	24124.45	96.12	2318744.21	0.38	9250.18	7.91	190794.63
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	24844.33	ΣX·U=	2391569.158	ΣY·U=	9250.18	ΣZ·U=	196913.59
	LCB=		96.26	TCB=		0.37	VCB= 7.93	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	461.94	172.40	79638.46	6.45	2977.20			
PB2	470.94	170.00	80059.80	5.50	2588.76			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	24853.00	ΣX·D=	2344162.12	ΣZ·D=	180768.30		
	LCG=		94.32	VCG=		7.27		
Rezultati								
	U-D=	-8.67	t					
	LCB - LCG =	1.9411	m =>ψ =	71.42	°			
	TCB - TCG =	0.3723	m => φ =	29.71	°			
	VCB - VCG =	0.6524	m					



Slika 73. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 1

Iz rezultata se vidi da Typhoon podmornica dobiva jako veliki trim i nagib, i to preko granica sigurnosti. Zato se predlaže da se napuni habitabilni prostor AOP a isprazne tankovi HTS3P, HTS3C, HTS3S i STRO6P. Time se dobivaju puno bolji rezultati no trim i dalje ne pada unutar sigurnosne granice od 25°. Novi rezultati su slijedeći (Tablica 16).

Tablica 16. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 1
2/2

Težište istisnine								
	U[m³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	23539.42	24127.90	95.25	2298091.39	0.31	7379.13	7.89	190369.03
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	24847.78	ΣX·U=	2370916.34	ΣY·U=	7379.13	ΣZ·U=	196487.98
LCB=			95.42	TCB=		0.297	VCB= 7.908	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	461.94	172.40	79638.46	6.45	2977.20			
PB2	470.94	170.00	80059.80	5.50	2588.76			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	24853.00	ΣX·D=	2344162.12	ΣZ·D=	180768.30		
LCG=			94.32	VCG=		7.27		
Rezultati								
U-D=		-5.22	t					
LCB - LCG =		1.097	m => ψ =	59.96	°			
TCB - TCG =		0.297	m => φ =	25.09	°			
VCB - VCG =		0.634	m					

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS									
Baseline draft: 16.031 @ Origin									
Trim: Aft 2.79 deg., Heel: Stbd 18.12 deg.									
Part-----			Weight (MT)		LCG-----		TCG-----		VCG-----
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416			
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)		LCG-----		TCG-----		VCG-----
									RefHt
PB1C	1.000	11.340	454.42	173.138f	0.042s	6.447			
PB2C	1.000	11.340	467.12	170.692f	0.044s	5.500			
PB3C	1.000	11.340	451.34	168.790f	0.044s	5.044			
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759			
Total Tanks----->			1,833.15	169.928f	0.043s	5.437			
Total Weight----->			24,828.39	94.247f	0.003s	7.270			
			Displ (MT)		LCB-----		TCB-----		VCB-----
TRUP		1.025	33,135.90	86.334f	1.138s	6.440	-15.218		
NREAKTORS	Flooded	1.025	-1,597.61	51.490f	5.836s	8.240	-15.218		
STROJS	Flooded	1.025	-584.22	31.812f	6.600s	8.167	-15.218		
MEHANIKA	Flooded	1.025	-252.12	33.974f	0.011s	10.320	-15.218		
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-609.99	167.073f	2.039s	5.266	-15.218		
FFRO1C	Flooded	1.025	-0.34	146.800f	10.505s	11.916	-15.218		
FFRO2C	Flooded	1.025	-154.39	112.531f	8.347s	12.369	-15.218		
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00						
FFKOMC	Flooded	1.025	-125.45	76.004f	4.933s	12.990	-15.218		
FFKOMS	Flooded	1.025	-235.04	79.657f	8.290s	13.221	-15.218		
FFREAKC	Flooded	1.025	-653.30	44.401f	4.374s	13.686	-15.218		
FFSTROJS	Flooded	1.025	-529.38	27.904f	4.003s	10.792	-15.218		
FFSTROJP	Flooded	1.025	-471.34	27.176f	3.521p	10.610	-15.218		
FFKRMAC	Flooded	1.025	-673.80	14.112f	0.023s	8.067	-15.218		
STAO1P	Flooded	1.025	-40.43	160.434f	8.426p	3.660	-15.218		
STAO2P	Flooded	1.025	-49.02	154.257f	8.593p	3.686	-15.218		
STRO1P	Flooded	1.025	-74.68	146.836f	8.726p	3.770	-15.218		
STRO2P	Flooded	1.025	-82.75	138.350f	8.854p	3.876	-15.218		
STRO3P	Flooded	1.025	-89.72	129.855f	8.966p	3.988	-15.218		
STRO4P	Flooded	1.025	-95.97	121.356f	9.067p	4.102	-15.218		
STREAK1S	Flooded	1.025	-392.31	57.456f	8.093s	5.248	-15.218		
HTREAK2C	Flooded	1.025	-260.13	46.515f	0.101s	10.110	-15.218		
STREAK2S	Flooded	1.025	-376.77	45.641f	8.102s	5.319	-15.218		
STSTROJ1S	Flooded	1.025	-161.64	35.942f	8.937s	5.870	-15.218		
STSTROJ2S	Flooded	1.025	-211.61	25.573f	8.317s	6.757	-15.218		
HTS1P	Flooded	1.025	-78.97	140.697f	2.951p	5.805	-15.218		
HTS1C	Flooded	1.025	-84.82	140.991f	0.043s	6.462	-15.218		
HTS1S	Flooded	1.025	-102.28	140.699f	2.856s	6.506	-15.218		
KTP	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.529p	2.966	-15.218		
Total Displacement-->			1.025	24,828.43	94.177f	0.477s	5.821		
Righting Arms:					0.004f	0.000s			
Distances in METERS.									

Slika 74. Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 1

6.6.2. Analiza oštećenja 2

U oštećenju 2 razmatra se čisti udar torpeda u bok podmornice, točnije na 82. m pod duljini. Prilikom udara torpeda smatra se da se oštetili habitabilni prostori od 72. m do 91. m prilikom čega je izbljeno 3697 m^3 istinsnine. Oštećenim i potpuno naplavljeni habitabilni prostorima smatraju se MOSTC, SPASS, PP1S, PP2S te prostori NT1C, NT2C, HTKOM2C, HTKOM3C, STPP2S i STPP3S.

Tablica 17. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 2

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	19700.67	20193.1868	97.392793	1966670.857	0.65857236	13298.6747	8.0241203	162032.5597
Konstrukcija	702.32	719.88	101.163004	72824.94514	0	0	8.50	6118.96
	ΣU=	20913.06	ΣX·U=	2039495.80	ΣY·U=	13298.6747	ΣZ·U=	168151.52
LCB= 97.5225726 TCB= 0.63590274 VCB= 8.0405012								
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23920.12	ΣX·D=	2184463.87	ΣZ·D=	175202.33		
LCG= 91.32 VCG= 7.32								
Rezultati								
U-D=		-3007.055	t					
LCB - LCG =		6.199	m =>ψ =	83.41	°			
TCB - TCG =		0.636	m =>φ =	41.61	°			
VCB - VCG =		0.716	m					

Nakon navedenog oštećenja slijedeći prostori se moraju napuniti odnosno isprazniti kako bi Typhoon podmornica postigla što ravniji trim, odnosno nagib

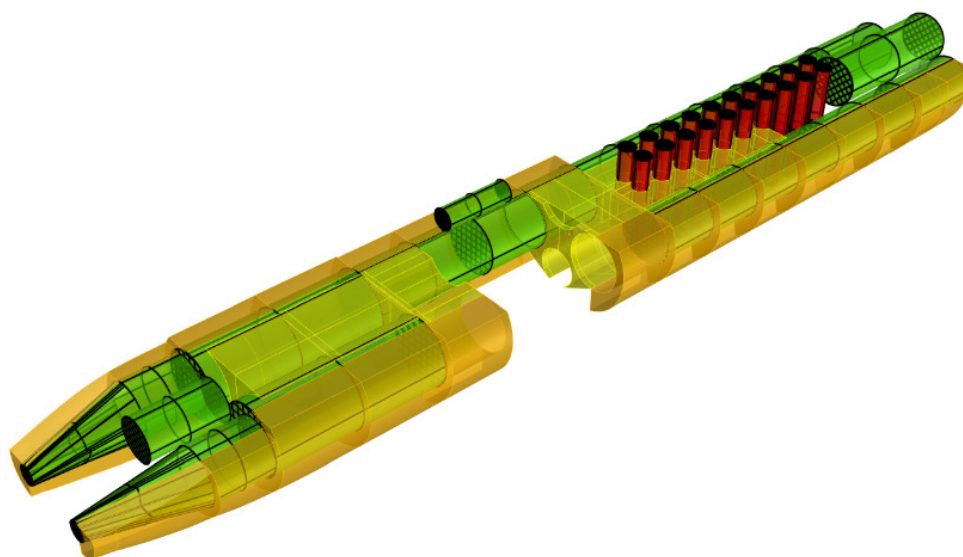
Napuniti se moraju: KTP, HTS1P, HTS1C, HTS1S, HTS2P, HTS2C, HTS2S.

Isprazniti se moraju: STAO1S, STAO2S, STRO1S, STRO2S, STRO3S, STRO4S, STRO5S, STRO6S, STPP1S, STPP4S, STPP1S, STPP2S, STPP3S, STPP4S, STREAK1S, STREAK2S, STSTROJ1S, STSTROJ2S, STRO6P, STPP1P, STPP2P, STPP3P, STPP4P, STPP1P, STPP2P, STPP3P, STPP4P, STREAK1P, STREAK2P, STSTROJ1P, STSTROJ2P.

Također čvrsti balasti PB1C i PB2C se smatraju odbačenima.

Tablica 18. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 2

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	22719.45	23287.44	91.102051	2121533.63	0.14092	3281.66617	7.6830199	178917.8716
Konstrukcija	702.32	719.88	101.163004	72824.95	0	0	8.50	6118.96
	ΣU=	24007.3181	ΣX·U=	2194358.57	ΣY·U=	3281.66617	ΣZ·U=	185036.8282
LCB= 91.4037361 TCB= 0.13669441 VCB= 7.7075177								
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23920.12	ΣX·D=	2184463.87	ΣZ·D=	175202.33		
LCG= 91.32 VCG= 7.32								
Rezultati								
U-D= 87.20		t						
LCB - LCG = 0.080		m =>ψ =	11.86	°				
TCB - TCG = 0.137		m => φ =	19.64	°				
VCB - VCG = 0.383		m						

**Slika 75. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 2**

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 11.753 @ Origin							
Trim: Aft 0.97 deg., Heel: Stbd 0.94 deg.							
Part-----			Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	RefHt
PB3C	1.000	11.340	451.34	168.790f	0.044s	5.044	
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759	
Total Tanks----->			911.61	167.935f	0.044s	4.900	
Total Weight----->			23,906.85	91.253f	0.002s	7.320	
			Displ (MT)----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	
TRUP		1.025	31,007.46	91.008f	0.077s	5.810	-11.750
PP1S	Flooded	1.025	-774.93	90.871f	6.398s	7.570	-11.750
PP2S	Flooded	1.025	-813.93	72.510f	6.396s	7.708	-11.750
MOSTC	Flooded	1.025	-1.74	68.267f	0.069s	10.542	-11.750
SPASS	Flooded	1.025	0.00				
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-824.44	167.354f	0.114s	5.811	-11.750
FFRO1C	Flooded	1.025	0.00				
FFRO2C	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMC	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMS	Flooded	1.025	0.00				
FFREAKC	Flooded	1.025	0.00				
FFSTROJS	Flooded	1.025	-303.80	25.847f	3.355s	9.838	-11.750
FFSTROJP	Flooded	1.025	-285.40	25.802f	3.221p	9.744	-11.750
FFKRMAC	Flooded	1.025	-671.91	14.102f	0.027s	8.058	-11.750
STAO1P	Flooded	1.025	-73.82	160.444f	9.321p	4.920	-11.750
STAO2P	Flooded	1.025	-85.02	154.288f	9.449p	4.958	-11.750
STRO1P	Flooded	1.025	-121.36	146.884f	9.506p	4.997	-11.750
STRO2P	Flooded	1.025	-126.34	138.390f	9.549p	5.047	-11.750
STRO3P	Flooded	1.025	-130.05	129.889f	9.581p	5.099	-11.750
STRO4P	Flooded	1.025	-133.11	121.385f	9.608p	5.153	-11.750
STRO5P	Flooded	1.025	-135.84	112.881f	9.631p	5.210	-11.750
STRO6P	Flooded	1.025	-138.28	104.376f	9.651p	5.269	-11.750
STPP1P	Flooded	1.025	-171.64	95.531f	9.283p	4.864	-11.750
STPP2S	Flooded	1.025	-179.35	86.347f	9.314s	5.079	-11.750
STPP3S	Flooded	1.025	-181.90	77.163f	9.326s	5.149	-11.750
HTKOM2C	Flooded	1.025	-312.45	86.337f	0.021s	6.576	-11.750
HTKOM3C	Flooded	1.025	-320.76	77.154f	0.021s	6.674	-11.750
KTP	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.529p	2.966	-11.750
NT1C	Flooded	1.025	-297.78	94.135f	0.003s	3.907	-11.750
NT2C	Flooded	1.025	-614.55	75.766f	0.004s	3.907	-11.750
PB1C	Flooded	1.025	-41.07	173.138f	0.042s	6.447	-11.750
PB2C	Flooded	1.025	-42.22	170.692f	0.044s	5.500	-11.750
Total Displacement-->	1.025		23,906.37	91.228f	0.029s	5.660	
Righting Arms:				0.003f	0.000s		
Distances in METERS.-----							

Slika 76. Rezultati stabilneta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 2

KN krivulje, usporedbu rezultata s IMO propisima, pologu stabilneta te izračunata površina ispod nje za oštećeno stanje 2 prikazano je u prilogu.

6.6.3. Analiza oštećenja 3

U oštećenju 3 razmatra se bočni udar torpeda u raketni odsjek na 117 m po duljini podmornice. Smatra se da je udar torpeda uzrokovao oštećenje od 100. m do 134 m prilikom čega je Typhoon podmornica izgubila 2930 m³ istisnine. Smatra da su oštećeni i potpuno naplavljeni habitabilni prostori RO2S i RO3S te prostori HTS3P, HTS3C, HTS3S, HTS4P, HTS4C, HTS4S, HTS5P, HTS5C, HTS5S, KTS, STRO3S, STRO4S, STRO5S i STRO6S.

Tablica 19. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 3

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	20614.76	21130.13	90.97	1922122.37	0.53	11191.91	8.33	176009.82
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	21850.003	ΣX·U=	1994947.31	ΣY·U=	11191.91	ΣZ·U=	182128.78
LCB= 91.3019257 TCB= 0.512215375 VCB= 8.335412106								
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23920.12	ΣX·D=	2184463.87	ΣZ·D=	175202.33		
LCG= 91.32 VCG= 7.32								
Rezultati								
U-D=		-2070.12	t					
LCB - LCG =		-0.021	m =>Ψ =	-1.21	°			
TCB - TCG =		0.512	m =>φ =	26.87	°			
VCB - VCG =		1.011	m					

Nakon navedenog oštećenja slijedeći prostori se moraju poplaviti odnosno isprazniti kako bi Typhoon podmornica imala što ravniji trim, odnosno nagib.

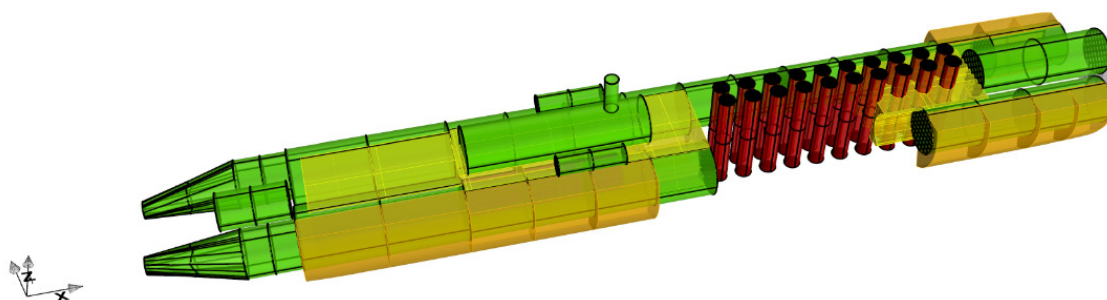
Napuniti se mora KTP.

Isprazniti se moraju: STAO1S, STAO2S, STRO1S, STRO2S, STAO1P, STAO2P, STRO1P, STPP2S, STPP3S, STPP4S, STREAK1S, STREAK2S.

Smatra se da su čvrsti balasti PB1C i PB2C odbačeni.

Tablica 20. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 3

Težište istisnine								
	U[m³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	22559.32	23123.30	90.95	2103114.40	-0.20	-4530.52	8.17	189026.61
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	23843.178	ΣX·U=	2175939.34	ΣY·U=	-4530.52	ΣZ·U=	195145.57
	LCB=		91.26	TCB=		-0.19	VCB= 8.18	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23920.12	ΣX·D=	2184463.866	ΣZ·D=	175202.33		
	LCG=		91.32	VCG=		7.32		
Rezultati								
U-D=		-76.94	t					
LCB - LCG =		-0.063	m =>ψ =	-4.18	°			
TCB - TCG =		-0.190	m =>φ =	-12.46	°			
VCB - VCG =		0.860	m					

**Slika 77. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 3**

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 11.030 @ Origin							
Trim: Aft 0.36 deg., Heel: Stbd 0.09 deg.							
Part-----			Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	RefHt
PB3C	1.000	11.340	451.34	168.790f	0.044s	5.044	
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759	
Total Tanks----->			911.61	167.935f	0.044s	4.900	
Total Weight----->			23,906.85	91.253f	0.002s	7.320	
			Displ (MT)-----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	
TRUP		1.025	32,091.77	93.447f	0.008s	5.934	-11.029
RO2S	Flooded	1.025	-585.50	125.627f	6.838s	7.723	-11.029
RO3S	Flooded	1.025	-596.18	108.616f	6.838s	7.770	-11.029
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-1,026.81	167.540f	0.035s	6.526	-11.029
FFRO1C	Flooded	1.025	0.00				
FFRO2C	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMC	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMS	Flooded	1.025	0.00				
FFREAKC	Flooded	1.025	0.00				
FFSTROJS	Flooded	1.025	-241.02	25.841f	3.053s	9.501	-11.029
FFSTROJP	Flooded	1.025	-239.66	25.849f	3.062p	9.493	-11.029
FFKRMAC	Flooded	1.025	-658.56	14.044f	0.025s	7.997	-11.029
STRO3S	Flooded	1.025	-140.98	129.894f	9.653s	5.465	-11.029
STRO4S	Flooded	1.025	-143.18	121.391f	9.667s	5.488	-11.029
STRO4P	Flooded	1.025	-142.68	121.391f	9.688p	5.471	-11.029
STRO5S	Flooded	1.025	-144.94	112.887f	9.677s	5.511	-11.029
STRO5P	Flooded	1.025	-144.45	112.887f	9.699p	5.495	-11.029
STRO6S	Flooded	1.025	-146.38	104.382f	9.686s	5.536	-11.029
STRO6P	Flooded	1.025	-145.85	104.382f	9.707p	5.519	-11.029
STPP1P	Flooded	1.025	-178.28	95.537f	9.337p	5.062	-11.029
STPP2P	Flooded	1.025	-179.57	86.353f	9.340p	5.085	-11.029
STPP3P	Flooded	1.025	-180.59	77.170f	9.342p	5.109	-11.029
STPP4P	Flooded	1.025	-181.35	67.986f	9.344p	5.136	-11.029
STREAK1P	Flooded	1.025	-335.59	57.451f	7.862p	4.129	-11.029
MBT3C	Flooded	1.025	-1,079.69	81.771f	0.016s	1.537	-11.029
HTS3P	Flooded	1.025	-92.36	124.032f	2.931p	6.772	-11.029
HTS3C	Flooded	1.025	-83.46	124.033f	0.013s	7.183	-11.029
HTS3S	Flooded	1.025	-92.52	124.031f	2.906s	6.777	-11.029
HTS4P	Flooded	1.025	-93.13	116.032f	2.930p	6.801	-11.029
HTS4C	Flooded	1.025	-84.14	116.032f	0.013s	7.207	-11.029
HTS4S	Flooded	1.025	-93.30	116.031f	2.905s	6.806	-11.029
HTS5P	Flooded	1.025	-146.33	105.815f	2.887p	6.855	-11.029
HTS5C	Flooded	1.025	-140.03	105.538f	0.013s	7.240	-11.029
HTS5S	Flooded	1.025	-146.56	105.815f	2.863s	6.861	-11.029
KTS	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.505s	2.967	-11.029
KTP	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.529p	2.966	-11.029
PB1C	Flooded	1.025	-41.07	173.138f	0.042s	6.447	-11.029
PB2C	Flooded	1.025	-42.22	170.692f	0.044s	5.500	-11.029
Total Displacement-->	1.025		23,906.61	91.241f	0.004s	5.996	

Righting Arms:				0.004a	0.000		
Distances in METERS.-----							

Slika 78. Rezultati stabilneta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 3

KN krivulje, usporedbu rezultata s IMO propisima, pologu stabilneta te izračunata površina ispod nje za oštećeno stanje 3 prikazano je u prilogu.

6.6.4. Analiza oštećenja 4

U oštećenju 4 razmatra se sličan događaj kao i kod oštećenja 3. Naime, razmatra se da je spremnik goriva balističke rakete spremljene u silosu S4S, na 127. m po duljini podmornice, eksplodirao i uzrokovao oštećenje od 120. m do 134 m prilikom čega izgubljeni volumen istisnine iznosi 3138 m³. Oštećenim i potpuno naplavljenim smatraju se habitabilni prostori RO2S i RO2P, silosi S3P, S3S, S4P, S4S, S5P, S5S te prostori HTS2P, HTS2C, HTS2S, HTS3P, HTS3C, HTS3S, KTP, KTS, STRO3S, STRO3P, STRO4S i STRO4P.

Tablica 21. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 4

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	20406.46	20916.62	89.23	1866485.86	0.00	-2.41	8.40	175648.04
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	21636.50	ΣX·U=	1939310.80	ΣY·U=	-2.41	ΣZ·U=	181767.00
	LCB=		89.63	TCB=		0.00	VCB= 8.40	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	0.00	168.55	0.00	5.04	0.00			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23462.18	ΣX·D=	2107278.08	ΣZ·D=	172894.32		
	LCG=		89.82	VCG=		7.37		
Rezultati								
U-D=		-1825.68	t					
LCB - LCG =		-0.185	m =>ψ =	-10.14	°			
TCB - TCG =		0.000	m => φ =	-0.01	°			
VCB - VCG =		1.032	m					

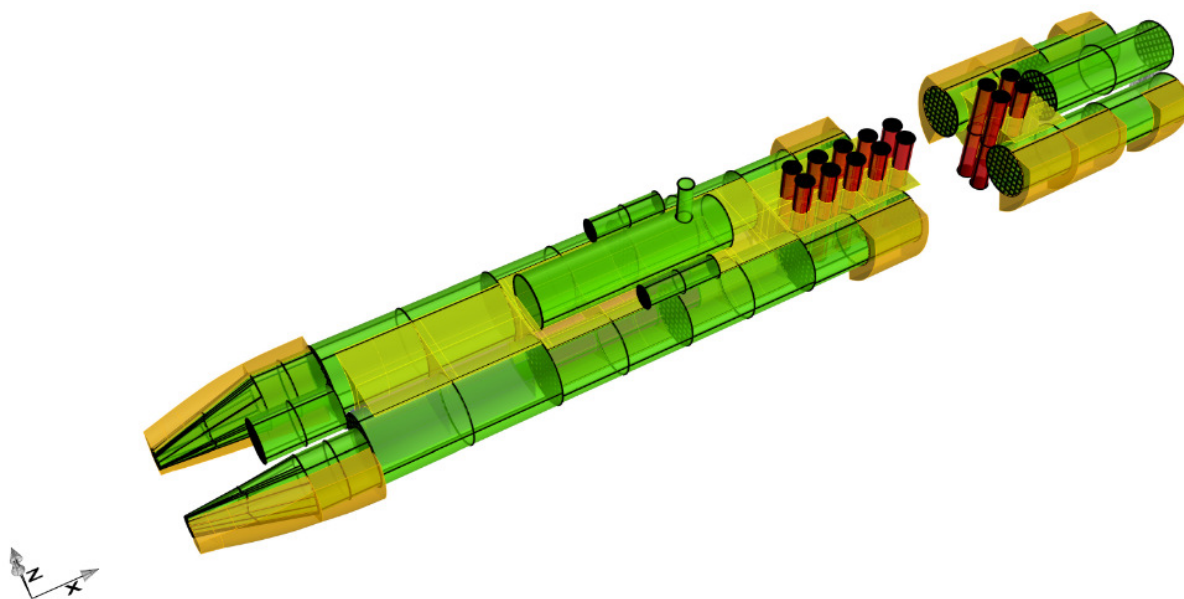
Nakon navedenog oštećenja slijedeći prostori se moraju napuniti odnosno isprazniti kako bi Typhoon podmornica imala što ravniji trim, odnosno heel

Isprazniti se moraju: STAO1S, STAO1P, STRO1S, STRO1P, STRO2S, STRO2P, STRO5S, STRO5P, STSTROJ1S, STSTROJ1P, STSTROJ2S, STSTROJ2P.

Smatra se da su čvrsti balasti PB1C, PB2C, PB3C odbačeni.

Tablica 22. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 4

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	22237.78	22793.72	89.43	2038374.25	0.00	-2.63	8.24	187853.95
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	23513.60	ΣX·U=	2111199.19	ΣY·U=	-2.63	ΣZ·U=	193972.91
LCB=			89.79	TCB=		0.00	VCB= 8.25	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	0.00	168.55	0.00	5.04	0.00			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	23462.18	ΣX·D=	2107278.08	ΣZ·D=	172894.32		
LCG=		89.82	VCG=		7.37			
Rezultati								
U-D=		51.42	t					
LCB - LCG =		-0.0296	m =>ψ =	-1.93	°			
TCB - TCG =		-0.0001	m =>φ =	-0.01	°			
VCB - VCG =		0.8803	m					

**Slika 79. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 4**

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 10.796 @ Origin							
Trim: Aft 0.16 deg., Heel: Stbd 0.03 deg.							
Part-----			Weight (MT)-----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)-----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	RefHt
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759	
Total Weight----->			23,455.52	89.761f	0.001	7.364	
			Displ (MT)-----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	
TRUP		1.025	32,388.95	94.177f	0.002s	5.973	-10.795
RO2P	Flooded	1.025	-602.73	125.642f	6.861p	7.798	-10.795
RO2S	Flooded	1.025	-603.46	125.642f	6.837s	7.801	-10.795
S3P	Flooded	1.025	-4.59	132.038f	1.412p	5.436	-10.795
S3S	Flooded	1.025	-4.59	132.038f	1.388s	5.437	-10.795
S4P	Flooded	1.025	-4.59	128.037f	1.412p	5.441	-10.795
S4S	Flooded	1.025	-4.59	128.037f	1.388s	5.442	-10.795
S5P	Flooded	1.025	-4.60	124.037f	1.412p	5.447	-10.795
S5S	Flooded	1.025	-4.60	124.038f	1.388s	5.448	-10.795
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-1,087.75	167.577f	0.030s	6.730	-10.795
FFRO1C	Flooded	1.025	0.00				
FFRO2C	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMC	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMS	Flooded	1.025	0.00				
FFREAKC	Flooded	1.025	0.00				
FFSTROJS	Flooded	1.025	-224.14	25.890f	2.976s	9.404	-10.795
FFSTROJP	Flooded	1.025	-223.77	25.896f	2.994p	9.401	-10.795
FFKRMAC	Flooded	1.025	-649.82	14.012f	0.024s	7.959	-10.795
STRO2S	Flooded	1.025	-141.05	138.397f	9.654s	5.547	-10.795
STRO2P	Flooded	1.025	-140.90	138.397f	9.678p	5.541	-10.795
STRO3S	Flooded	1.025	-143.65	129.896f	9.670s	5.556	-10.795
STRO3P	Flooded	1.025	-143.51	129.896f	9.694p	5.550	-10.795
STRO4S	Flooded	1.025	-145.50	121.393f	9.681s	5.565	-10.795
STRO4P	Flooded	1.025	-145.32	121.393f	9.705p	5.560	-10.795
STRO5S	Flooded	1.025	-146.88	112.889f	9.689s	5.576	-10.795
STRO5P	Flooded	1.025	-146.72	112.889f	9.713p	5.570	-10.795
STRO6S	Flooded	1.025	-147.92	104.384f	9.695s	5.587	-10.795
STRO6P	Flooded	1.025	-147.73	104.384f	9.718p	5.581	-10.795
STPP1S	Flooded	1.025	-179.94	95.539f	9.324s	5.112	-10.795
STPP1P	Flooded	1.025	-179.76	95.539f	9.348p	5.107	-10.795
STPP2S	Flooded	1.025	-180.76	86.355f	9.324s	5.121	-10.795
STPP2P	Flooded	1.025	-180.60	86.355f	9.347p	5.116	-10.795
HTKOM1C	Flooded	1.025	-325.21	95.540f	0.013s	6.726	-10.795
HTKOM2C	Flooded	1.025	-325.83	86.355f	0.013s	6.733	-10.795
NBT3C	Flooded	1.025	-1,079.69	81.771f	0.016s	1.537	-10.795
HTS2P	Flooded	1.025	-94.95	132.034f	2.929p	6.868	-10.795
HTS2C	Flooded	1.025	-85.62	132.035f	0.013s	7.262	-10.795
HTS2S	Flooded	1.025	-95.00	132.034f	2.905s	6.870	-10.795
HTS3P	Flooded	1.025	-95.31	124.035f	2.930p	6.882	-10.795
HTS3C	Flooded	1.025	-85.92	124.035f	0.012s	7.273	-10.795
HTS3S	Flooded	1.025	-95.37	124.034f	2.905s	6.884	-10.795
KTS	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.505s	2.967	-10.795
KTP	Flooded	1.025	-319.39	122.523f	4.529p	2.966	-10.795
NT1C	Flooded	1.025	-297.78	94.135f	0.003s	3.907	-10.795
PB1C	Flooded	1.025	-41.07	173.138f	0.042s	6.447	-10.795
PB2C	Flooded	1.025	-42.22	170.692f	0.044s	5.500	-10.795
PB3C	Flooded	1.025	-40.80	168.790f	0.044s	5.044	-10.795
Total Displacement-->	1.025		23,455.95	89.758f	0.002s	6.044	
Righting Arms:				0.000	0.000		
Distances in METERS.-----							

Slika 80. Rezultati stabilneta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 4

KN krivulje, usporedbu rezultata s IMO propisima, pologu stabilneta te izračunata površina ispod nje za oštećeno stanje 2 prikazano je u prilogu.

6.6.1. Analiza oštećenja 5

Ovim oštećenjem simulirao se udar torpeda u područje pregrade između prostora AOS i RO1S, točnije na udar se je desio na 151 m po duljini podmornice. Smatra se da je udar uzrokovao oštećenje od 134. m do 165. m prilikom čega izgubljeni volumen istisnine iznosi 1206.66 m³. Smatra se da su oštećeni i potpuno naplavljeni habitabilni prostori AOS te RO1S te ST tankovi STAO1S, STAO1S, STRO1S i STRO2S. (Tablica 23).

Tablica 23. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 5

Težište istisnine								
	U[m³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	22338.85	22897.32	91.16	2087319.81	0.3820	8746.78	8.23	188444.95
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	23617.20	ΣX·U=	2160144.75	ΣY·U=	8746.78	ΣZ·U=	194563.91
	LCB=		91.46	TCB=		0.37	VCB= 8.24	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	461.94	172.40	79638.46	6.45	2977.20			
PB2	470.94	170.00	80059.80	5.50	2588.76			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	24853.00	ΣX·D=	2344162.122	ΣZ·D=	180768.3		
	LCG=		94.32	VCG=		7.27		
Rezultati								
U-D=		-1235.80	t					
LCB - LCG =		-2.856	m =>ψ =	-71.34	°			
TCB - TCG =		0.370	m => φ =	21.00	°			
VCB - VCG =		0.965	m					

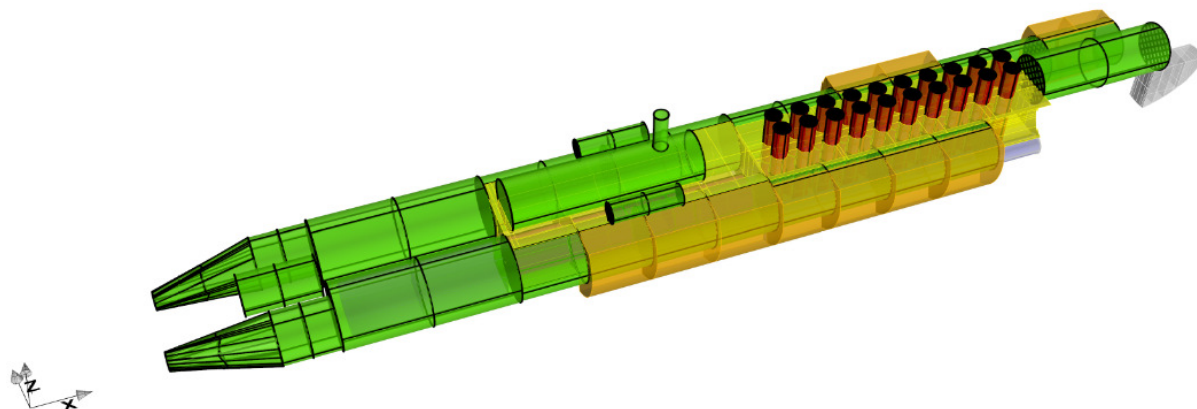
Da bi se Typhoon podmornica vratila u što ravniji položaj mora se izvršiti balastiranje kojim se moraju napuniti, odnosno isprazniti d morske vode slijedeći tankovi:

Napuniti se moraju: HTKOM4C, HTREAK1C i HTREAK2C

Isprazniti se moraju: NT1C, STAO1P, STAO2P, STRO3S, STRO3P, STRO4S, STRO4P, STRO5S, STRO6S, STPP1S, STPP2S, STPP3S.

Tablica 24. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 5

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	23562.54	24151.61	94.27	2276732.50	0.04	918.17	7.99	192930.95
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	24871.48	ΣX·U=	2349557.45	ΣY·U=	918.17	ΣZ·U=	199049.91
	LCB=		94.468	TCB=		0.037	VCB= 8.00	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	461.94	172.40	79638.46	6.45	2977.20			
PB2	470.94	170.00	80059.80	5.50	2588.76			
PB3	457.94	168.55	77185.79	5.04	2308.02			
PB4	466.94	168.75	78796.13	5.04	2354.01			
	ΣD=	24853.00	ΣX·D=	2344162.12	ΣZ·D=	180768.30		
	LCG=		94.32	VCG=		7.27		
Rezultati								
U-D=		18.48	t					
LCB - LCG =		0.147	m =>ψ =	11.38	°			
TCB - TCG =		0.037	m =>φ =	2.90	°			
VCB - VCG =		0.730	m					

**Slika 81. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 5**

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 10.663 @ Origin							
Trim: Fwd 2.22 deg., Heel: Stbd 2.04 deg.							
Part-----			Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
FIXED WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
	Load-----	SpGr-----	Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	RefHt
PB1C	1.000	11.340	454.42	173.138f	0.042s	6.447	
PB2C	1.000	11.340	467.12	170.692f	0.044s	5.500	
PB3C	1.000	11.340	451.34	168.790f	0.044s	5.044	
PB4C	1.000	11.340	460.27	167.098f	0.044s	4.759	
Total Tanks----->			1,833.15	169.928f	0.043s	5.437	
Total Weight----->			24,828.39	94.247f	0.003s	7.270	
			Displ (MT)----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	
TRUP		1.025	43,881.52	98.928f	0.053s	7.689	-10.648
AOS	Flooded	1.025	-517.70	157.471f	6.837s	8.240	-10.648
RO1S	Flooded	1.025	-698.99	142.665f	6.837s	8.240	-10.648
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-1,828.32	167.497f	0.026s	9.129	-10.648
FFRO1C	Flooded	1.025	-1,151.72	154.368f	0.053s	14.138	-10.648
FFRO2C	Flooded	1.025	-2,821.46	123.715f	0.176s	13.472	-10.648
FFKOMP	Flooded	1.025	-161.12	84.540f	8.291p	12.920	-10.648
FFKOMC	Flooded	1.025	-427.77	86.835f	0.404s	13.138	-10.648
FFKOMS	Flooded	1.025	-215.92	83.271f	8.294s	13.123	-10.648
FFREAKC	Flooded	1.025	-40.78	58.705f	5.353s	12.965	-10.648
FFSTROJS	Flooded	1.025	-406.42	27.551f	3.893s	10.325	-10.648
FFSTROJP	Flooded	1.025	-339.72	27.027f	3.400p	10.027	-10.648
FFKRMAC	Flooded	1.025	-670.12	14.094f	0.033s	8.049	-10.648
STAO1S	Flooded	1.025	-103.60	160.458f	9.531s	6.564	-10.648
STRO1S	Flooded	1.025	-164.89	146.896f	9.672s	6.500	-10.648
STRO2S	Flooded	1.025	-169.12	138.400f	9.694s	6.487	-10.648
STPP2P	Flooded	1.025	-218.07	86.357f	9.423p	6.218	-10.648
STPP3P	Flooded	1.025	-218.17	77.174f	9.419p	6.215	-10.648
STPP4P	Flooded	1.025	-217.94	67.991f	9.415p	6.212	-10.648
HTKOM3C	Flooded	1.025	-382.15	77.173f	0.013s	7.429	-10.648
HTKOM4C	Flooded	1.025	-392.29	67.887f	0.013s	7.534	-10.648
STREAK1P	Flooded	1.025	-383.49	57.500f	8.101p	5.077	-10.648
HTREAK1C	Flooded	1.025	-313.94	57.508f	0.048s	10.119	-10.648
STREAK2P	Flooded	1.025	-353.69	45.680f	8.071p	4.853	-10.648
HTREAK2C	Flooded	1.025	-233.92	46.648f	0.086s	9.827	-10.648
STSTROJ1S	Flooded	1.025	-161.64	35.942f	8.937s	5.870	-10.648
STSTROJ1P	Flooded	1.025	-161.62	35.942f	8.962p	5.870	-10.648
STSTROJ2S	Flooded	1.025	-211.61	25.573f	8.317s	6.757	-10.648
STSTROJ2P	Flooded	1.025	-211.61	25.573f	8.342p	6.757	-10.648
MBT1C	Flooded	1.025	-1,871.05	154.293f	0.020s	4.220	-10.648
MBT2P	Flooded	1.025	-683.23	122.572f	4.515p	2.088	-10.648
MBT2C	Flooded	1.025	-359.19	122.723f	0.020s	1.951	-10.648
MBT2S	Flooded	1.025	-683.60	122.572f	4.555s	2.087	-10.648
MBT3C	Flooded	1.025	-1,079.69	81.771f	0.016s	1.537	-10.648
MBT4C	Flooded	1.025	-1,202.10	31.049f	0.012s	4.642	-10.648
Total Displacement-->	1.025		24,824.87	94.237f	0.006p	7.535	
Righting Arms:				0.001f	0.000s		
Distances in METERS.-----							

Slika 82. Rezultati stabilитета Typhoon podmornice na površini za oštećenje 5 KN krivulje, usporedbu rezultata s IMO propisima, pologu stabiliteta te izračunata površina ispod nje za oštećeno stanje 2 prikazano je u prilogu.

6.6.1. Analiza oštećenja 6

U oštećenju 6 simulirao se događaj koji je uzrokovao tragediju koja se dogodila podmornici *Kursk*. Naime, uslijed eksplozije goriva jednog od torpeda došlo je do proboja trupa koji je uzrokovao gubitak podmornice. U ovom slučaju simulirana je puno jača eksplozija. Smatra se da se je eksplozija dogodila na 166. m prilikom čega se je oštetio trup podmornice od 151. m do 175. m. Volumen oštećenja iznosi 2060 m³. Ovaj slučaj oštećenja se može poistovjetiti s direktnim frontalnim udarom torpeda u pramac Typhoon podmornice.

Smatra se da su oštećeni i potpuno naplavljeni habitabilni prostori TORPEDOC, AOS i AOP te balastni tankovi STAO1S, STAO1P, STAO2S, STAO2P. Prilikom ovog oštećenja smatra se da su izgubljeni čvrsti balasti PB1C, PB2C, PB3C, PB4C.

Tablica 25. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata za stanje oštećenja 6

Težište istisnine								
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]
Svi prostori	21484.00	22021.10	88.02	1938345.11	0.00	-3.81	8.11	178488.61
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96
	ΣU=	22740.9764	ΣX·U=	2011170.06	ΣY·U=	-3.8105206	ΣZ·U=	184607.56
	LCB=		88.44	TCB=		0.00	VCB= 8.118	
Težište mase								
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]			
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31			
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00			
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00			
PB3	0.00	168.55	0.00	5.04	0.00			
PB4	0.00	168.75	0.00	5.04	0.00			
	ΣD=	22995.24	ΣX·D=	2028481.95	ΣZ·D=	170540.31		
	LCG=		88.21	VCG=		7.42		
Rezultati								
U-D=		-254.2626	t					
LCB - LCG =		0.225	m =>ψ =	17.79	°			
TCB - TCG =		0.000	m => φ =	-0.01	°			
VCB - VCG =		0.702	m					

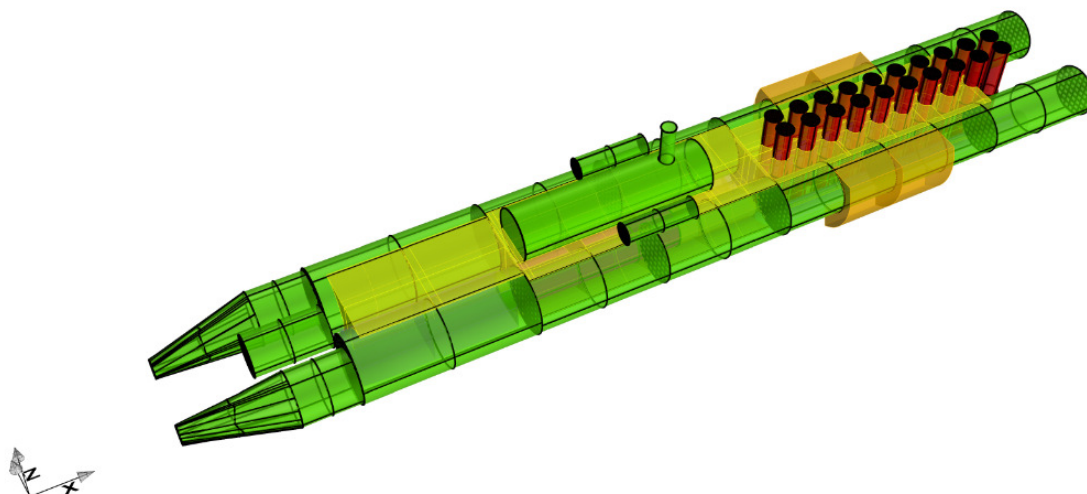
Nakon navedenog oštećenja slijedeći prostori se moraju napuniti odnosno ispraznit kako bi Typhoon podmornica imala što ravniji trim, odnosno nagib

Napuniti se moraju: HTS1P, HTS1C, HTS1S

Isprazniti se moraju: STRO4P, STRO4S, STRO5P, STROS.

Tablica 26. Prikaz proračuna stabiliteta i rezultata nakon balastiranja za stanje oštećenja 6

Težište istisnine									
	U[m ³]	U[t]	X [m]	X·U [tm]	Y [m]	Y·U [tm]	Z [m]	Z·U [tm]	
Svi prostori	21743.19	22286.77	87.90	1959018.88	0.00	0.00	8.06	179599.45	
Konstrukcija	702.32	719.88	101.16	72824.95	0.00	0.00	8.50	6118.96	
	ΣU=	23006.64	ΣX·U=	2031843.82	ΣY·U=	0	ΣZ·U=	185718.41	
	LCB=		88.32	TCB=		0	VCB=		8.07
Težište mase									
	D [t]	X [m]	X·D [tm]	Z [m]	Z·D [tm]				
masa Typhoona	22995.24	88.21	2028481.95	7.42	170540.31				
PB1	0.00	172.40	0.00	6.45	0.00				
PB2	0.00	170.00	0.00	5.50	0.00				
PB3	0.00	168.55	0.00	5.04	0.00				
PB4	0.00	168.75	0.00	5.04	0.00				
	ΣD=	22995.24	ΣX·D=	2028481.954	ΣZ·D=	170540.31			
	LCG=		88.21	VCG=		7.42			
Rezultati									
U-D=		11.4035	t						
LCB - LCG =		0.102	m => ψ =	8.87	°				
TCB - TCG =		0.000	m => φ =	0.00	°				
VCB - VCG =		0.656	m						

**Slika 83. Prikaz svih prostora koji sudjeluju u uzgonu nakon balastiranja za oštećenje 6**

WEIGHT and DISPLACEMENT STATUS							
Baseline draft: 11.129 @ Origin							
Trim: Aft 0.25 deg., Heel: Stbd 0.08 deg.							
Part-----			Weight (MT)----	LCG-----	TCG-----	VCG-----	
WEIGHT			22,995.24	88.214f	0.000	7.416	
		SpGr-----	Displ (MT)----	LCB-----	TCB-----	VCB-----	RefHt
TRUP		1.025	33,058.11	93.874f	0.006s	6.068	-11.129
TORPEDOC	Flooded	1.025	-241.43	155.498f	0.015s	9.497	-11.129
AOP	Flooded	1.025	-446.18	157.462f	6.861p	7.797	-11.129
AOS	Flooded	1.025	-447.57	157.462f	6.838s	7.805	-11.129
FFPRAMACC	Flooded	1.025	-1,102.06	167.581f	0.033s	6.777	-11.129
FFRO1C	Flooded	1.025	0.00				
FFRO2C	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMP	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMC	Flooded	1.025	0.00				
FFKOMS	Flooded	1.025	0.00				
FFREAKC	Flooded	1.025	0.00				
FFSTROJS	Flooded	1.025	-258.35	25.896f	3.125s	9.598	-11.129
FFSTROJP	Flooded	1.025	-256.94	25.900f	3.131p	9.590	-11.129
FFKRMAC	Flooded	1.025	-663.88	14.065f	0.024s	8.020	-11.129
STPP1S	Flooded	1.025	-183.05	95.538f	9.344s	5.206	-11.129
STPP1P	Flooded	1.025	-182.58	95.538f	9.366p	5.192	-11.129
STSTROJ1S	Flooded	1.025	-152.31	35.949f	8.884s	5.539	-11.129
STSTROJ1P	Flooded	1.025	-151.90	35.949f	8.906p	5.525	-11.129
MBT1C	Flooded	1.025	-1,799.99	154.289f	0.021s	3.940	-11.129
MBT2P	Flooded	1.025	-683.23	122.572f	4.515p	2.088	-11.129
MBT2C	Flooded	1.025	-359.19	122.723f	0.020s	1.951	-11.129
MBT2S	Flooded	1.025	-683.60	122.572f	4.555s	2.087	-11.129
MBT3C	Flooded	1.025	-1,079.69	81.771f	0.016s	1.537	-11.129
MBT4C	Flooded	1.025	-1,202.10	31.049f	0.012s	4.642	-11.129
PB1C	Flooded	1.025	-41.07	173.138f	0.042s	6.447	-11.129
PB2C	Flooded	1.025	-42.22	170.692f	0.044s	5.500	-11.129
PB3C	Flooded	1.025	-40.80	168.790f	0.044s	5.044	-11.129
PB4C	Flooded	1.025	-41.60	167.098f	0.044s	4.759	-11.129
Total Displacement-->		1.025	22,998.37	88.210f	0.001s	6.575	

Righting Arms:				0.000	0.000		
Distances in METERS.-----							

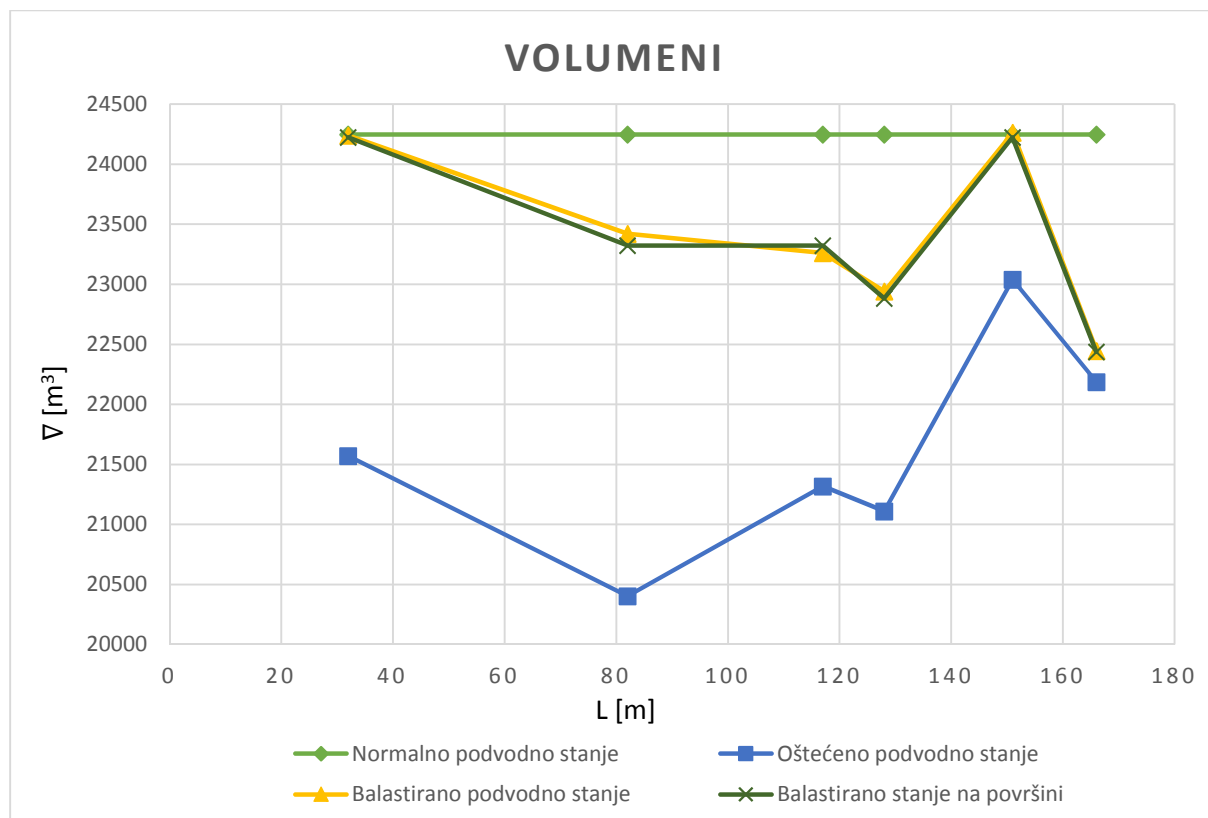
Slika 84. Rezultati stabiliteta Typhoon podmornice na površini za oštećenje 6 KN krivulje, usporedbu rezultata s IMO propisima, pologu stabiliteta te izračunata površina ispod nje za oštećeno stanje 2 prikazano je u prilogu.

6.6.2. Usporedba analiza svih 6 oštećenja i njezin zaključak

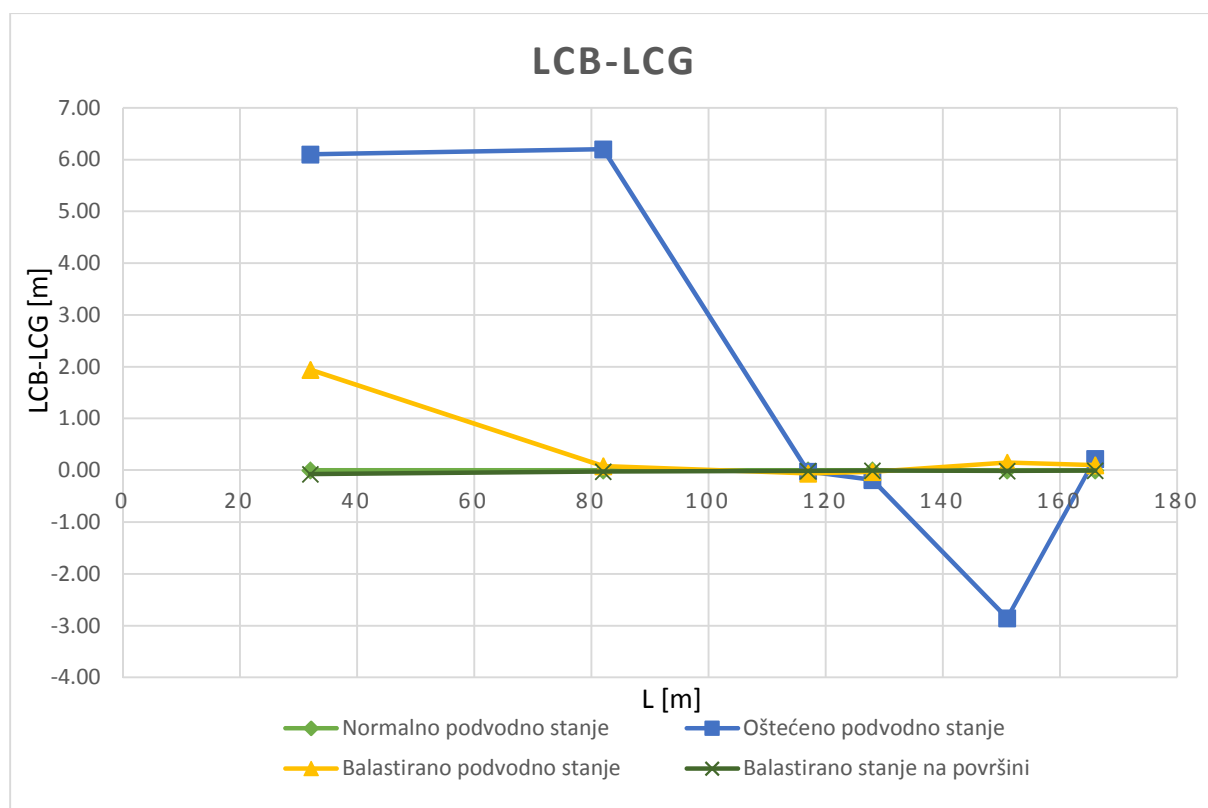
Tablica 27. Usporedba rezultata svih analiziranih oštećenja

		Oštećenje 1	Oštećenje 2	Oštećenje 3	Oštećenje 4	Oštećenje 5	Oštećenje 6
Pozicija oštećenja po duljini L [m]		32	82	117	128	151	166
Prije oštećenja	∇ [m ³]	24246.83	24246.83	24246.83	24246.83	24246.83	24246.83
	LCB - LCG [m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ψ [°]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	TCB - TCG [m]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	φ [°]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	VCB - VCG [m]	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
∇ oštećenja [m ³]		2675.54	3843.12	2929.76	3138.05	1205.66	2060.51
Nakon oštećenja	∇ [m ³]	21571.29	20403.71	21317.07	21108.78	23041.17	22186.32
	LCB - LCG [m]	6.10	6.20	-0.02	-0.18	-2.86	0.23
	Ψ [°]	81.46	83.41	-1.21	-10.14	-71.34	17.79
	TCB - TCG [m]	0.61	0.64	0.51	0.00	0.37	0.00
	φ [°]	33.49	41.61	26.87	-0.01	21.00	-0.01
	VCB - VCG [m]	0.92	0.72	1.01	1.03	0.96	0.70
Nakon balastiranja	∇ [m ³]	24238.37	23421.77	23261.64	22940.10	24264.86	22445.50
	LCB - LCG [m]	1.94	0.08	-0.06	-0.03	0.15	0.10
	Ψ [°]	71.42	11.86	-4.18	-1.93	11.38	8.87
	TCB - TCG [m]	0.37	0.14	-0.19	0.00	0.04	0.00
	φ [°]	29.71	19.64	-12.46	-0.01	2.90	0.00
	VCB - VCG [m]	0.65	0.38	0.86	0.88	0.73	0.66
Prijedlog punjenja odsjeka AOP za stanje oštećenja 3	∇ [m ³]	24241.74					
	LCB - LCG [m]	1.10					
	Ψ [°]	59.96					
	TCB - TCG [m]	0.30					
	φ [°]	25.09					
	VCB - VCG [m]	0.63					
Na morskoj površini	∇ [m ³]	24222.86	23323.29	23323.52	22883.85	24222.82	22437.43
	LCB - LCG [m]	-0.07	-0.03	-0.01	0.00	-0.01	0.00
	Ψ [°]	2.79	0.97	0.36	0.16	2.22	0.25
	TCB - TCG [m]	0.47	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	φ [°]	18.12	0.94	0.09	0.03	2.04	0.08
	VCB - VCG [m]	-1.45	-1.66	-1.32	-1.32	0.47	-0.84

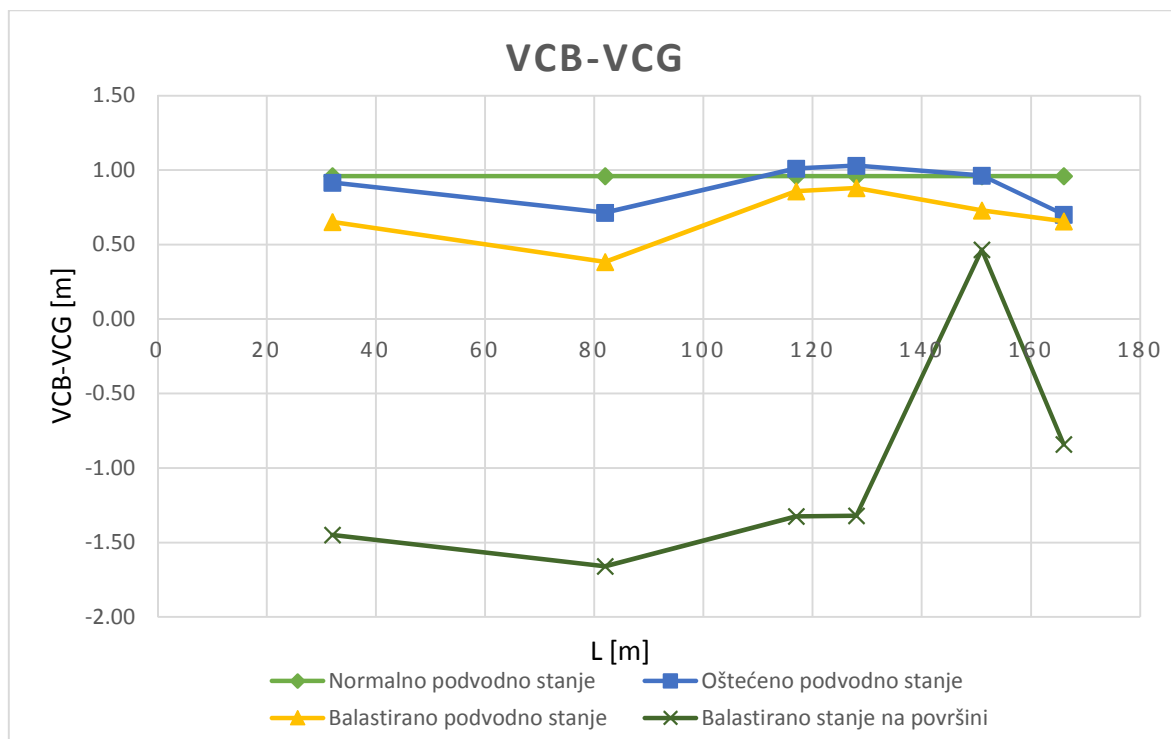
U tablici (Tablica 27) oštećenja su po stupcima linearno poredana po pozicijama oštećenja, odnosno udara, po duljini podmornice od krme prema pramcu. Grafička usporedba rezultata za svaku poziciju analiziranog oštećenja, odnosno udara iz tablice (Tablica 27) prikazana je slikama (Slika 85, Slika 86, Slika 87, Slika 88, Slika 89, Slika 90) na kojima se može jasno razlučiti odnos veličina za normalno podvodno stanje, oštećeno podvodno stanje, balastirano oštećeno podvodno stanje i balastirano oštećeno stanje na morskoj površini.



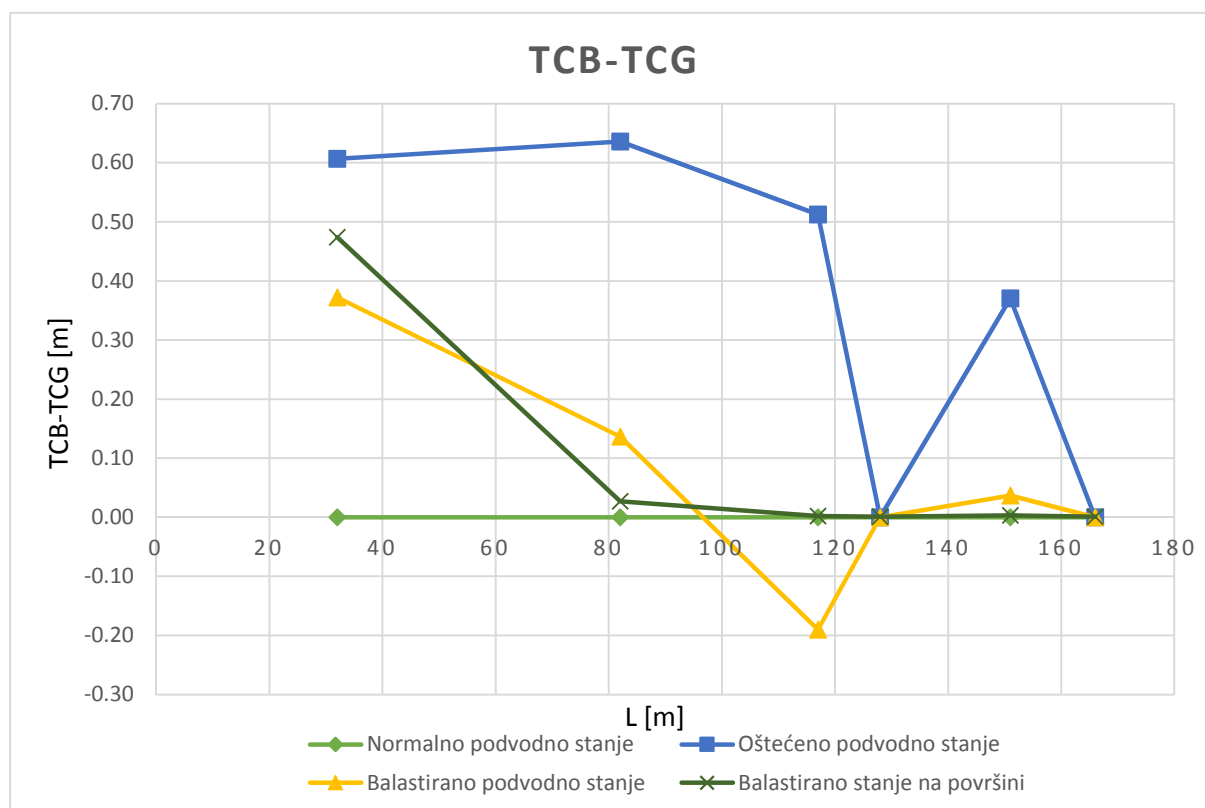
Slika 85. Usporedba volumena podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima



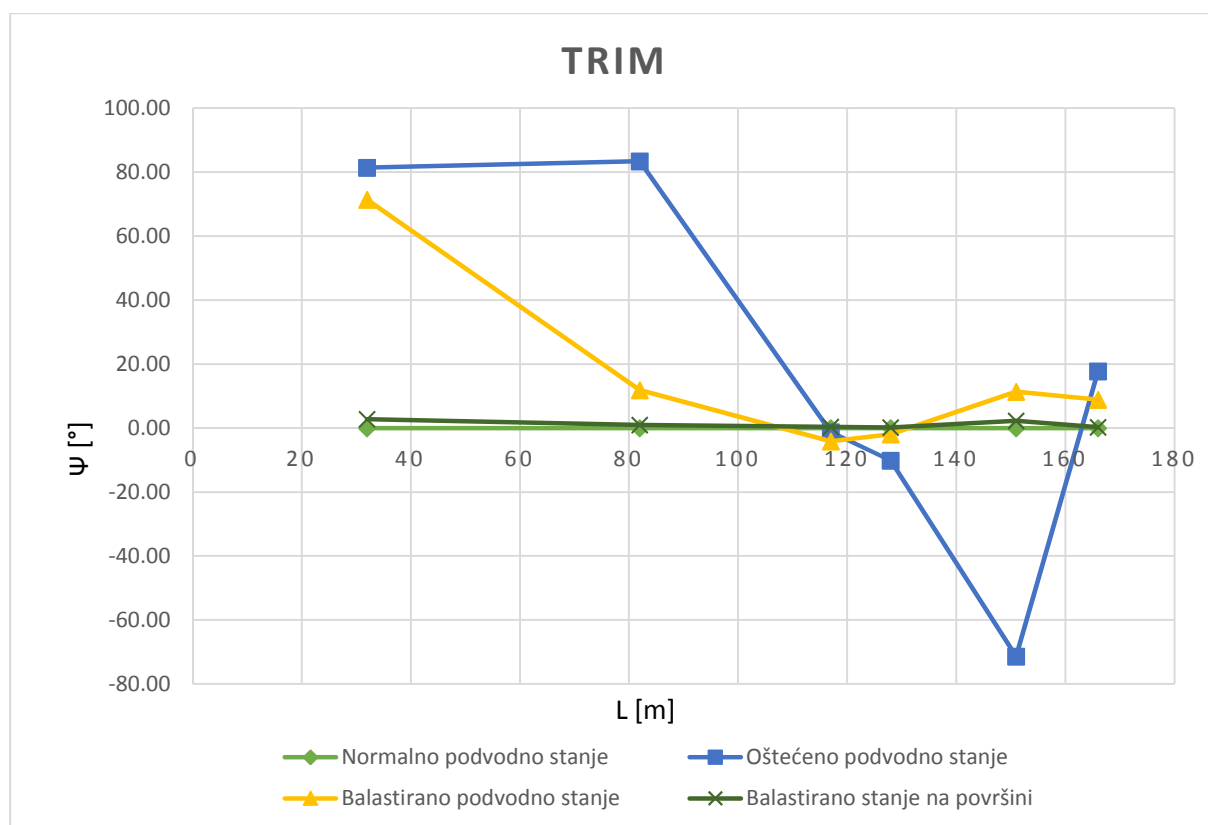
Slika 86. Usporedba odnosa LCB-a i LCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima



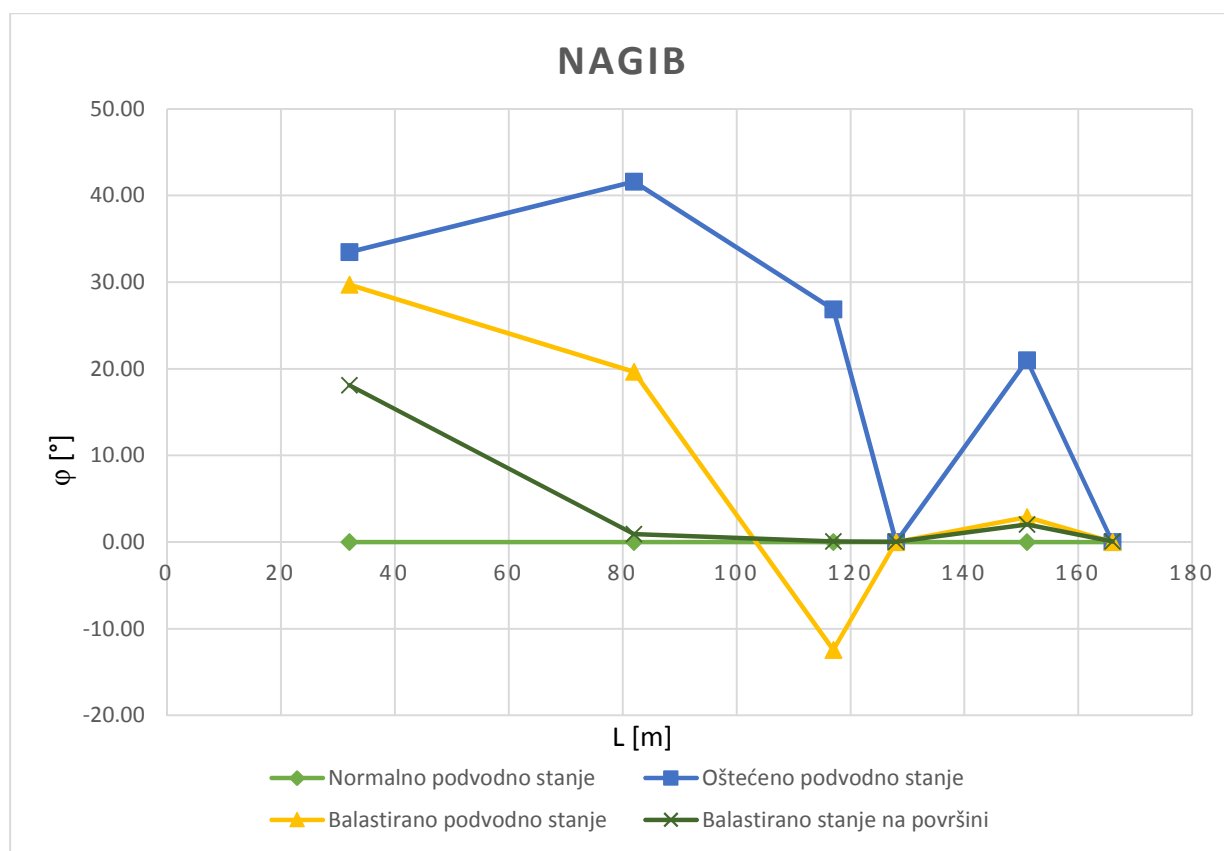
Slika 87. Usporedba odnosa VCB-a i VCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima



Slika 88. Usporedba odnosa TCB-a i TCG-a podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima



Slika 89. Usporedba trimova podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima



Slika 90. Usporedba nagiba podmornice u svima razmatranim stanjima i oštećenjima

Zaključak stabilитета oštećene podmornice:

Na slici (Slika 85) se primjećuje da se volumeni istisnine podmornice u zaronjenom stanju i na površini poklapaju. Time je dokazano da se volumeni prostora prilikom kreiranja GHS datoteke u programu Rhino ne mijenjaju. Do minimalnih odstupanja u volumenima došlo je prilikom nemogućnosti definiranja naplavlljivosti prostora u programu Rhino kako je već i opisano. Sa slike (Slika 86) se primjećuje da je nakon svakog, osim 1. oštećenja moguće balastiranjem maksimalno smanjiti razliku između LCB-a i LCG-a. No koliko god se smanji ta razlika, trim se gotovo uvijek pojavljuje kod oštećene zaronjene podmornice dok se kod podmornice na površini on može relativno dobro kontrolirati (Slika 89). Taj zaključak utemeljuje tvrdnju da su podmornice općenito „osjetljive“ na trim. Ista stvar se primjećuje i kod nagiba samo su njegove promjene manjeg intenziteta (Slika 90) nego kao kod trima. Uvjet da se VCB uvijek nalazi iznad VCG-a je ispunjen za sva analizirana oštećenja za podmornicu u podvodnom stanju plovidbe, dok se kod podmornice na morskoj površini njihov odnos se očekivano promijenio osim za oštećeno stanje 5. Kod oštećenog stanja 5 radi smanjenja trima i nagiba na podmornici je ukrcana velika količina balasta prilikom čega je podmornica dobila veći gaz čime se je težište uzgona popelo iznad težišta mase (kao što je rečeno, program GHS proračuna stabiliteta vrši metodom dodane mase).

Analizom stabiliteta podmornica Typhoon klase u oštećenom stanju utvrđeno je da ta klasa može pretrpjeti velika oštećenja u podvodnom stanju. Od svih analiziranih oštećenja, osim oštećenja 1, podmornica Typhoon klase može nakon oštećenja balastiranjem maksimalno smanjiti trim i nagib te nakon toga, ako joj pogonski ustav ostane neoštećen može se sama dovesti do najbliže luke. Analizom svih oštećenja utvrđeno je da oštećenje 1 tj. oštećenje krme uzrokuje kritičnu štetu. Naime, oštećenjem na toj poziciji dolazi do takvih trimova i nagiba koje je nemoguće smanjiti balastiranjem balastnih tankova. Prema danom prijedlogu, moguće je poplaviti neke od habitabilnih prostora i time smanjiti posljedice oštećenja no upitno je da li u praksi takva opcija uopće dolazi u obzir. Također, nakon oštećenja krme ne dolazi samo do kritičnih trimova i nagiba nego se istovremeno oštećuje pogon same podmornice čime je daljnja operativnost podmornice upitna. Takav scenarij prilikom oštećenja krme nije samo karakterističan za Typhoon klasu nego već i za sve ostale klase podmornica, pogotovo nuklearno pogonjenih podmornica.

7. ZAKLJUČAK

Podmornice su naj kompleksniji i najskuplji ljudski proizvod. One predstavljaju vrhunac tehnologije i inženjerstva. No, među svim svjetskim klasama podmornica Typhoon klasa podmornica je klasa koja je u svim aspektima bolja od svih ostalih klasa pri čemu se Typhoon klasu može smatrati i najkompleksnijim ljudskim proizvodom ikad napravljenim. Nažalost, ona se koristi u vojnim svrhama te s tog aspekta ne pridonosi čovječanstvu. Naprotiv, čak ima sposobnost uništiti cijeli svijet. No, pored te činjenice ipak se analizom njene izvedbe i načina rada mogu dobiti informacije koje mogu pridonijeti čovječanstvu. Sama klasa je nastala nadmetanjem dviju svjetskih velesila i time ostavlja svoj trag u periodu ljudske povijesti kada je ono zbog svoje gluposti moglo biti uništeno.

Ovim radom su se pokušali razjasniti svi detalji vezani za Typhoon klasu na temelju dostupnih podataka i dosadašnjeg stečenog znanja. Rezultati napravljene analize su slijedeći:

- Izrađenim 3-D modelom Typhoon klase podmornice dobiven je realniji oblik i razmak teoretskih rebra i konačni volumen lakog trupa koji se poklapa s podacima iz navedene literature.
- Na temelju izrađenog 3-D modela s čvrstim trupovima unutar lakog trupa aproksimirana je stvarna konstrukcija čijom su se analizom ustvrdila konačne dimenzije konstrukcije.
- Na temelju dostupnih podataka o dimenzijama konstrukcije i opterećenja kojim je opterećena podmornica potvrđena je mogućnost da su čvrsti trupovi izvedeni od titana.
- Utvrđena je masa podmornice što je vrlo važan podatak jer se literaturi navode različite mase. Utvrđenom masom podmornice dobiven je potreban volumen istisnine podmornice u zaronjenom stanju što direktno utječe na raspored i konstrukciju habitabilnih prostora i balastnih tankova, a što pak utječe na karakteristike stabiliteta.
- Na temelju dobivene mase i literature utvrđen je raspored i konstrukcija balastnih tankova. Također je dan uvid u različite tipove balastnih tankova.
- Analizom stabiliteta, na temelju utvrđenog rasporeda balastnih tankova dan je uvid u osjetljivost stabiliteta podmornice u zaronjenom stanju prilikom faze projektiranja te kasnije prilikom oštećenja same podmornice u stvarnosti.
- Utvrđena je razlika u rezervi istisnine u zaronjenom stanju i podmornice na površini. Naime, utvrđeno je da samo određeni balastni tankovi, ovisno i njihovoj konstrukciji i

poziciji mogu sudjelovati u uzgonu dok je podmornica zaronjena. Utvrđen je i položaj i volumen sigurnosnih tankova te oni predstavljaju rezervu istisnine. Volumen tih tankova je oko 6500 m^3 do je volumen tankova koji sudjeluju u uzgonu u normalnom zaronjenom stanju oko 23500 m^3 . Ovo znači da Typhoon klasa ima skoro 30% rezerve istisnine što je u prosjeku skoro duplo više od ostalih podmornica. To znači da sama podmornica nosi ogromnu količinu mora sa sobom i k tome ima veliku površinu trupa što opravdava zahtjeva za velikom snagom reaktora ($2 \times 190 \text{ MW}$)

Budući da je jedna od podmornica Typhoon klase još uvijek u službi, detaljniji podaci poput podataka vezanih za strukturu Typhoon klase vojna su tajna te ti podaci nisu dostupni. Zbog toga se ovaj rad temelji na nekolicini dostupnih podataka i niza pretpostavki zbog čega rezultati provedene analize mogu odstupati od stvarnih podataka. No, zato analiza daje jedan sistematski uvid odgovora na pitanja vezana za samu osnovu projektiranja, konstrukciju i upravljanje Typhoon klase podmornice. Jedan od podataka dobiven analizom je da udaljenost između VCB-a i VCG-a iznosi 0.96 m što je vjerojatno previše u odnosu na standardnu udaljenost VCB-a i VCG-a koja se kod modernih podmornica kreće između 15 i 35 cm . Ali, s obzirom da je Typhoon klasa podmornice jedinstvena klasa podatak je možda i realan. Također, razlog ovom rezultatu može biti u tome što su težišta svih masa pretpostavljena zbog nepoznavanja njihovog točnog rasporeda i njihovih težišta. To daje mogućnost za potpuno drukčije rezultate u stvarnosti. Također, jedna od mogućih krivih pretpostavki je i raspored balastnih tankova. Naime, i njihov raspored nije poznat što znači da se je njihova pozicija pretpostavljala prema intuiciji i logici rješavanja problema stabiliteta podmornice. No, analizom je razjašnjeno da su za plovidbu podmornice u zaronjenom stanju potrebni tvrdi tankovi što u nijednom literaturi nije navedeno. Analizom je također utvrđeno da Typhoon klasa podmornica može preživjeti velika oštećenja.

No, kako je rečeno u uvodu, cilj provedene analize je da se na primjeru jednog kompleksnog ljudskog proizvoda, kao što je Typhoon klasa podmornica, dobiju nove ideje i saznanja te novi pogledi u tehnologiji i konstrukciji korisni u brodogradnji što je ovaj rad i postigao.

LITERATURA

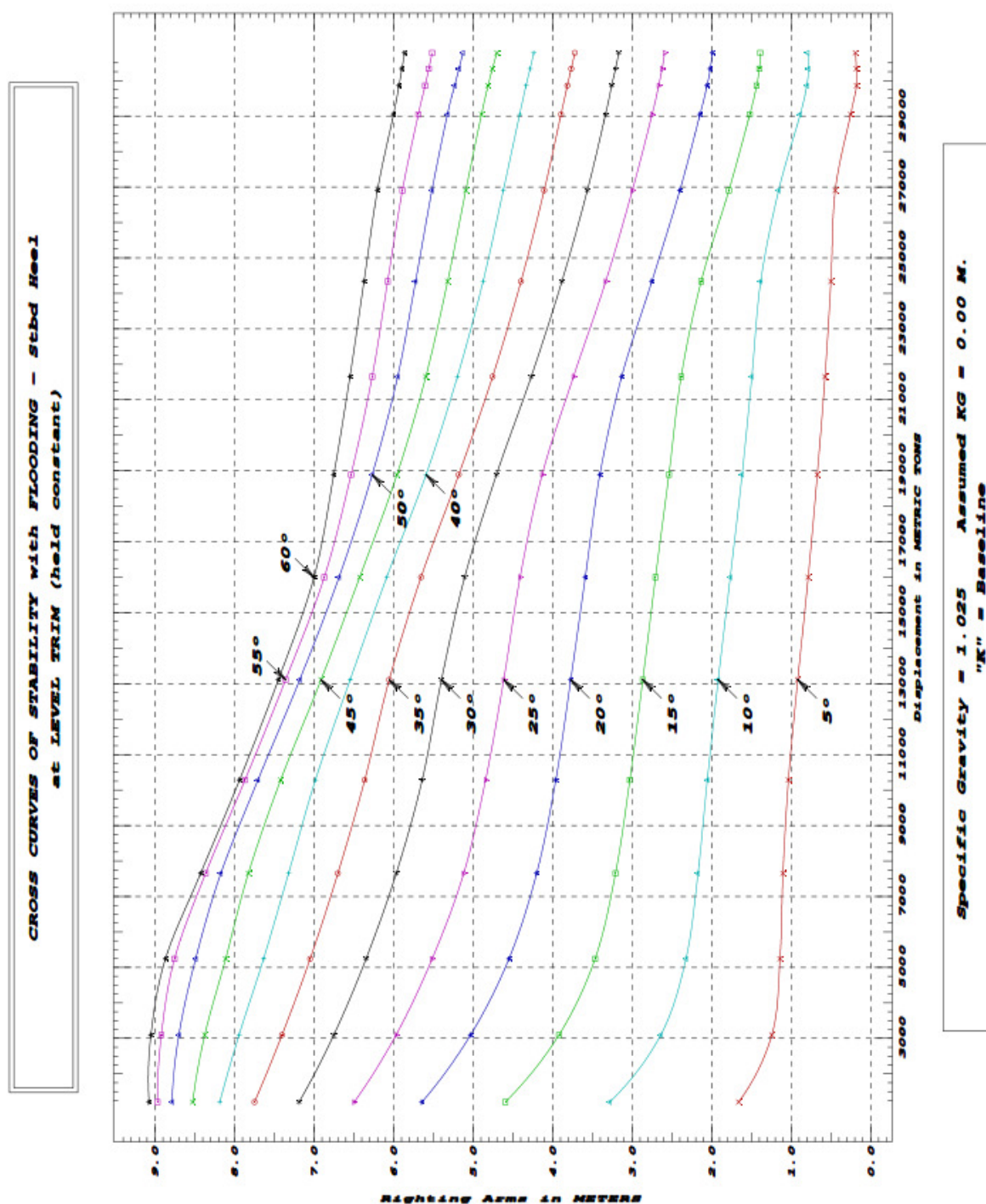
- [1] www.uboa.net/special/faq.htm?question=4
- [2] Secrets Of The Dead: Japanese SuperSub
- [3] <http://notasperdidasenlaweb.blogspot.com/2013/03/aichi-m6a-seiran.html>
- [4] <http://www.geocities.jp/i400s/>
- [5] www.defence24.pl/news_zlokalizowano-wrak-okretu-podwodnego-i-400
- [6] The Silent War: The Russians Are Coming, BBC
- [7] <http://missilethreat.com/missiles/r-39-ss-n-20/>
- [8] <http://blisty.cz/art/45218.html>
- [9] http://albums.modelbrouwers.nl/coppermine/albums/userpics/11284/nog_inkleuren_g_oed.jpg
- [10] <http://k45.kn3.net/taringa/3/4/4/1/6/7/1/conclavista/25F.jpg?7924>
- [11] www.myetymology.com/encyclopedia/Project_941_%E2%80%9CAkula%E2%80%9D.html
- [12] <http://www.strangecosmos.com/images/content/145532.jpg>
- [13] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typhoon_class_Schema.svg
- [14] <http://www.submarinesonstamps.co.il/History.aspx?h=297>
- [15] www.militaryphotos.net/forums/showthread.php?99988-Russian-Photos-%28updated-on-regular-basis%29/page3005
- [16] National Geographic Mega Breakdown: Soviet Doomsday Sub
- [17] <http://submarine-information.blogspot.com/2012/08/project-941.html>
- [18] <http://militaryrussia.ru/blog/topic-578.html>
- [19] Štulhofer, D.: "The analysis of the dimensioning criteria and elaboration of the design method for the cylindrical shell reinforced by equally spaced ring frames under uniform external pressure", University of Zagreb, Zagreb 1980.
- [20] Rajko, G., Danko M.: "Strenght analysis of submarine pressure hull", Brodogradnja 46(1998)1, p.30-39.
- [21] <http://www.matweb.com>
- [22] Germanischer Lloyd 2008: III – Naval Ship Technology; 2- Sub-surface ships; 1- Submarine
- [23] <http://www.enemyforces.net/navy/941.htm>

- [24] <http://moremhod.info/index.php/library-menu/16-morskaya-tematika/189-pf8?showall=1&limitstart=>
- [25] <http://www.nkj.ru/archive/articles/10854/>
- [26] <http://trash-russia.com/inside-giant-russian-typhoon-class-submarine-tk-17-arkhangelsk/>
- [27] <http://www.queenfish.org/noframes/subfood.html>
- [28] <http://web.mit.edu/12.000/www/mission2005websitefolder/a2/8/pdf1.pdf>
- [29] http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=9190&page=42
- [30] http://glossary.periodni.com/preuzimanje_slike.php?name=nuklearni_reaktor.png&source=nuklearni+reaktor
- [31] <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/eng/stmplt1.jpg>
- [32] http://www.alternatewars.com/BBOW/Nuclear/US_Naval_Reactors.htm
- [33] Pogon broda II, Šneller S., Parat Ž.
- [34] <http://www.hnsa.org/doc/fleetsub/elect/chap5.htm>
- [35] <http://viewer.zmags.com/publication/a1a5d07d#/a1a5d07d/114>
- [36] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Minuteman_III_MIRV_Flight.svg
- [37] <http://igor113.livejournal.com/27205.html>
- [38] http://www.navweaps.com/Weapons/WTRussian_post-WWII.htm
- [39] http://weaponsystems.net/menu/wsmenu.php#weaponsystems_menu.php?que=hh14%20-%20TORP
- [40] <http://www.militaryphotos.net/forums/archive/index.php/t-206530.html>
- [41] <http://wp11082610.server-he.de/www/typhon-klasse---bilder---detail.html>
- [42] *Concepts in Submarine Design* Roy Burcher, Louis J. Rydill
- [43] <http://hnsa.org/doc/oberon/principles/img/pg013.jpg>
- [44] <http://lillianwengscience7.weebly.com/2-scientific-principles.html>
- [45] http://i23.servimg.com/u/f23/09/01/51/33/uss_da10.jpg
- [46] US-Navy-Fleet-Submarine-Manual-1946
- [47] <http://www.uboat.cz/down/zajm/typhoon2.gif>
- [48] Cold War Submarines: The Design and Construction of U.S. and Soviet Submarines
By Norman Polmar, Kenneth J. Moore
- [49] J. Uršić – stabilitet broda II dio
- [50] http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html

[51] ABS - rules for building and classing underwater vehicles, systems and hyperbaric Facilities 2041

[52] Diplomski rad, Božidar Ukas, Zagreb, 2005.

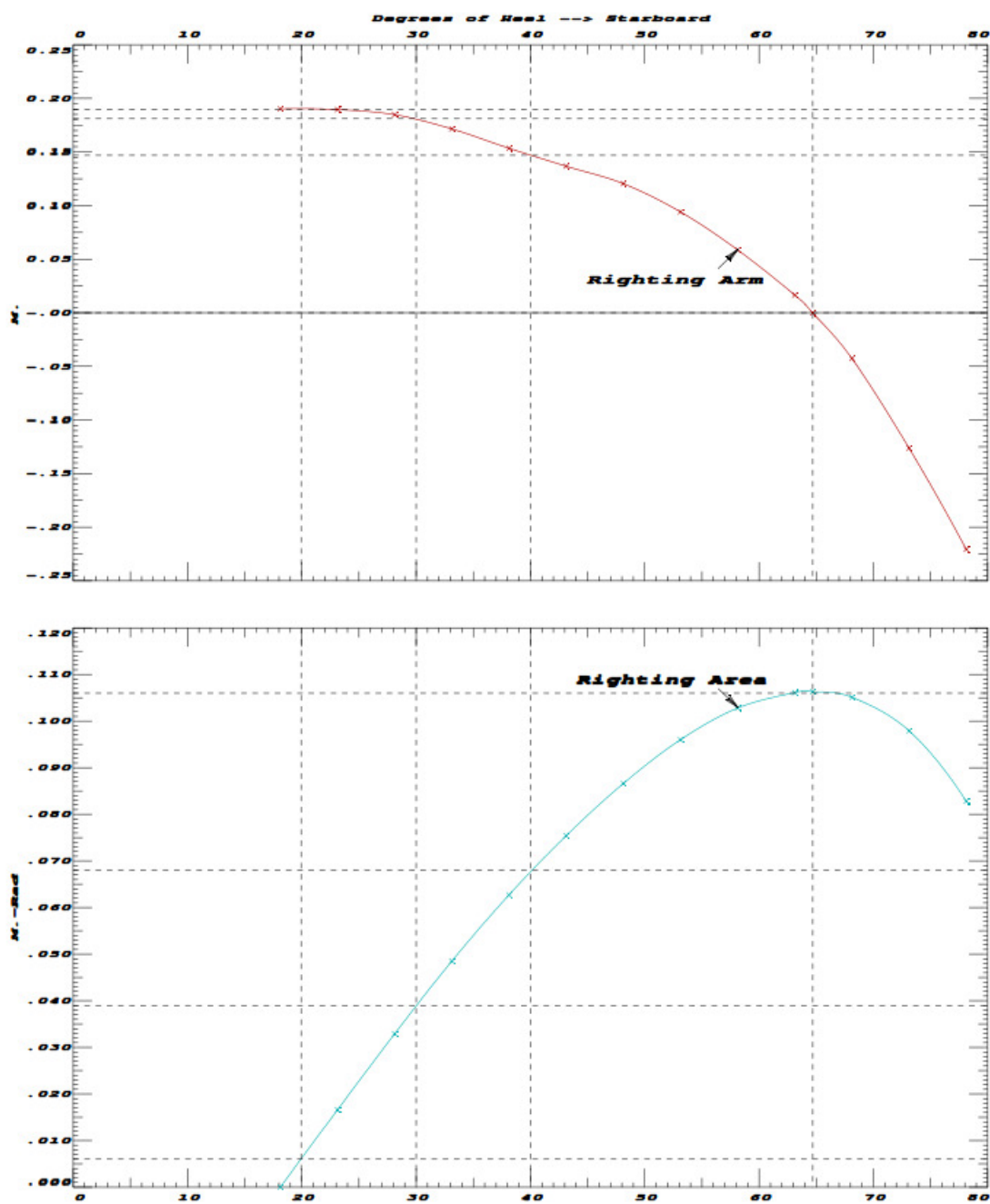
PRILOG



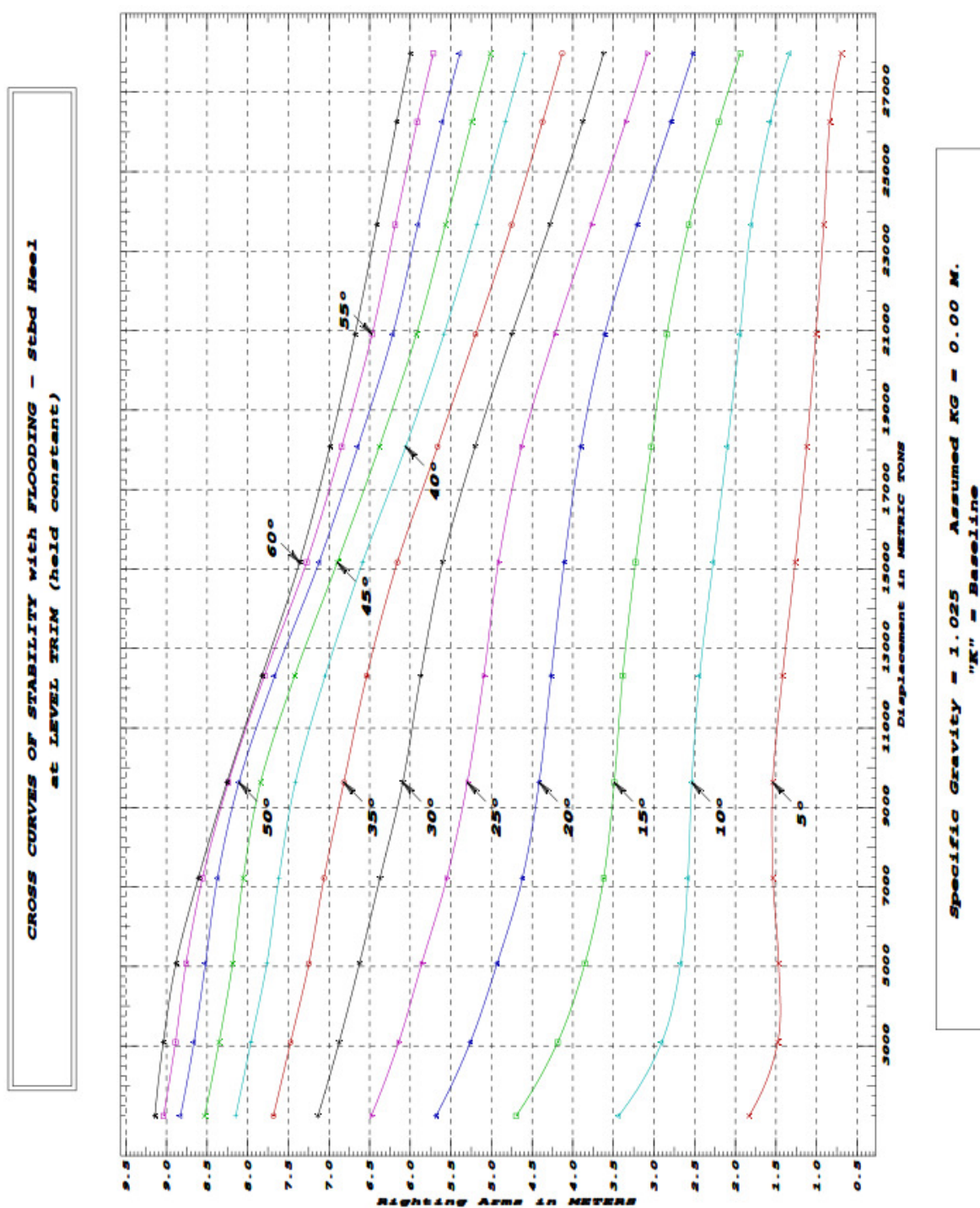
Slika 91. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 1 na površini.

LIM-----	STABILITY CRITERION-----	Min/Max-----	Margin
(1) Area from 0 deg to 30		> 0.0550 m.-Rad	57%
(2) Area from 0 deg to 40		> 0.0900 m.-Rad	14%
(3) Area from 30 deg to 40		> 0.0300 m.-Rad	-46%
(4) Righting Arm at MaxRA		> 0.200 m.	-5%
(5) Absolute Angle at MaxRA		> 25.00 deg	-7 deg
(6) GM Upright		> 0.150 m.	1823%
-----Relative angles measured from 18.117s-----			

Slika 92. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 1 na površini.



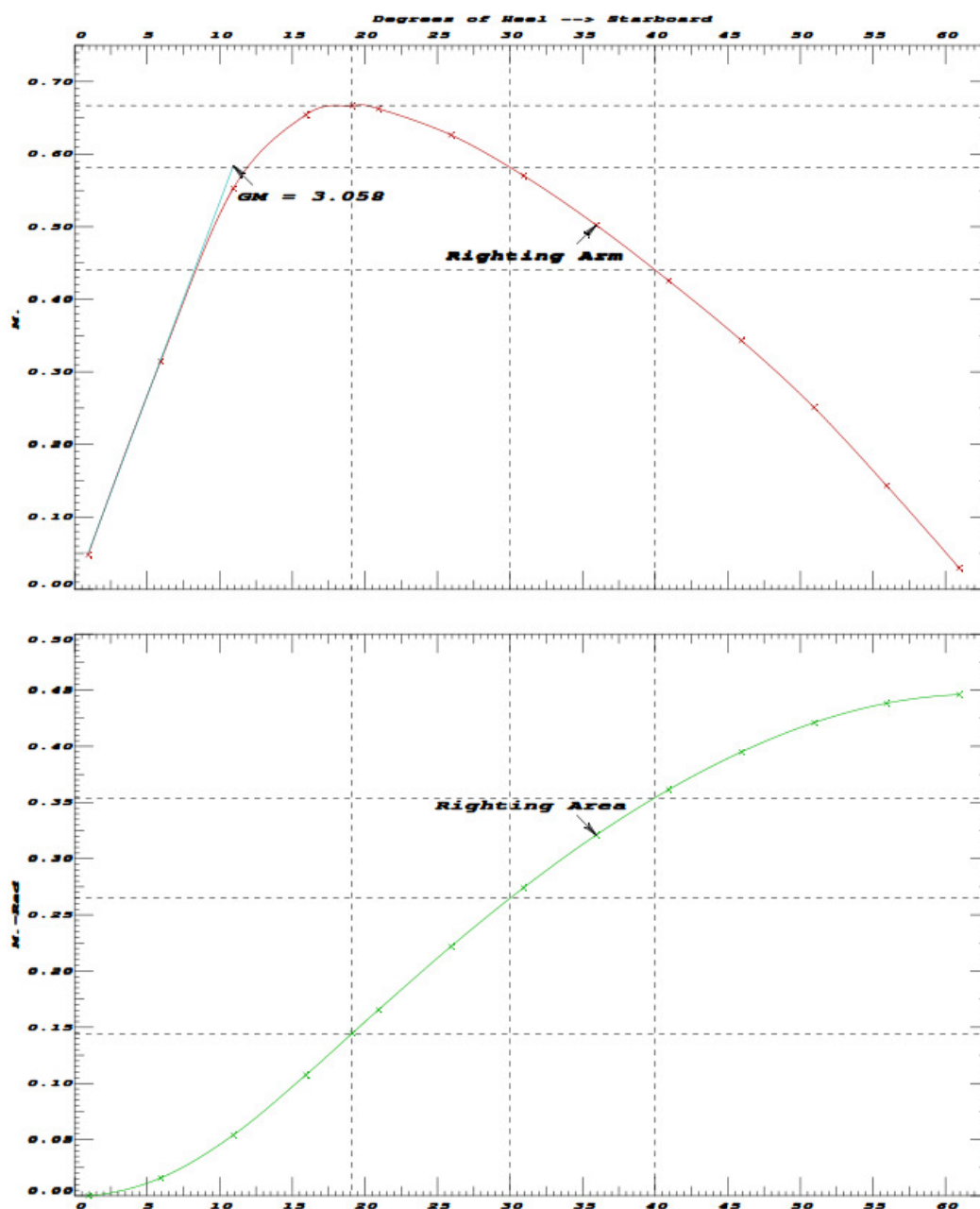
Slika 93. Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 1



Slika 94. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 2 na površini.

LIM-----	STABILITY CRITERION-----	Min/Max-----	Margin-----
(1) Area from 0 deg to 30		> 0.0550 m.-Rad	399%
(2) Area from 0 deg to 40		> 0.0900 m.-Rad	302%
(3) Area from 30 deg to 40		> 0.0300 m.-Rad	191%
(4) Righting Arm at MaxRA		> 0.200 m.	233%
(5) Absolute Angle at MaxRA		> 25.00 deg	-6 deg
(6) GM Upright		> 0.150 m.	193%
-----Relative angles measured from 0.938s-----			

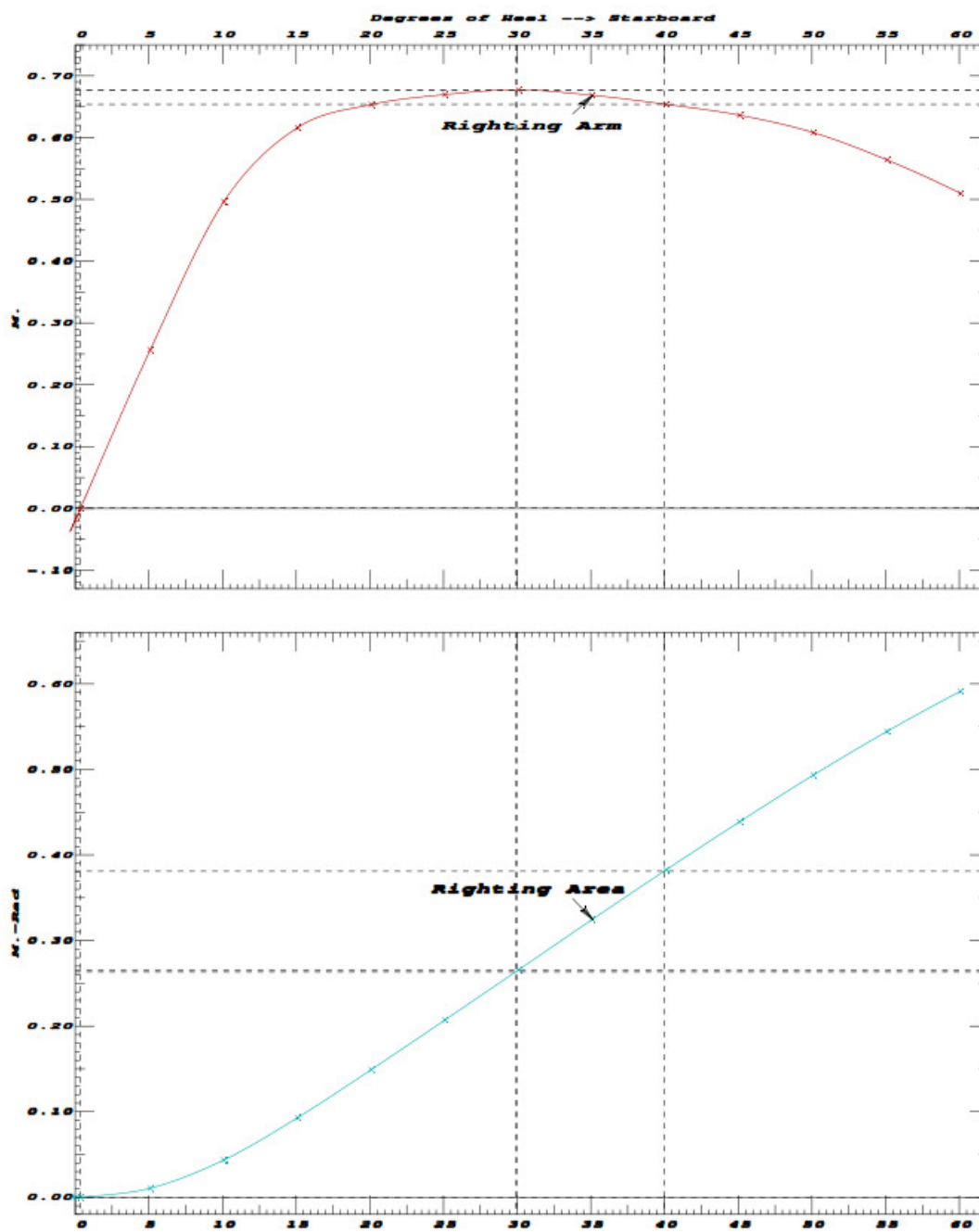
Slika 95. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 2 na površini.



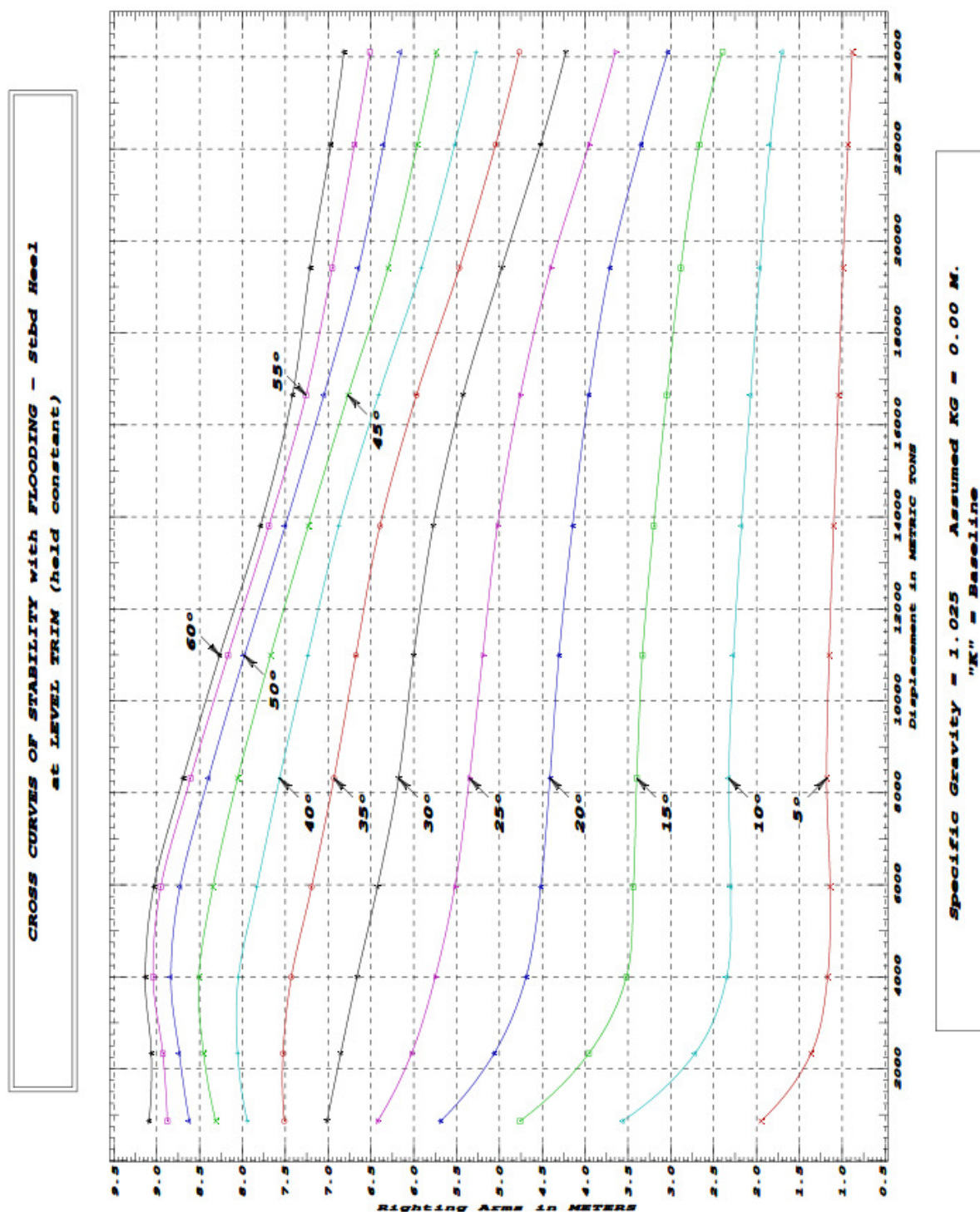
Slika 96. Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 2 na površini.

LIM-----	STABILITY CRITERION-----	Min/Max-----	Margin-----
(1)	Area from 0 deg to 30	> 0.0550 m.-Rad	383%
(2)	Area from 0 deg to 40	> 0.0900 m.-Rad	325%
(3)	Area from 30 deg to 40	> 0.0300 m.-Rad	289%
(4)	Righting Arm at MaxRA	> 0.200 m.	239%
(5)	Absolute Angle at MaxRA	> 25.00 deg	5 deg
(6)	GM Upright	> 0.150 m.	1960%
-----Relative angles measured from 0.095 -----			

Slika 97. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 3 na površini.



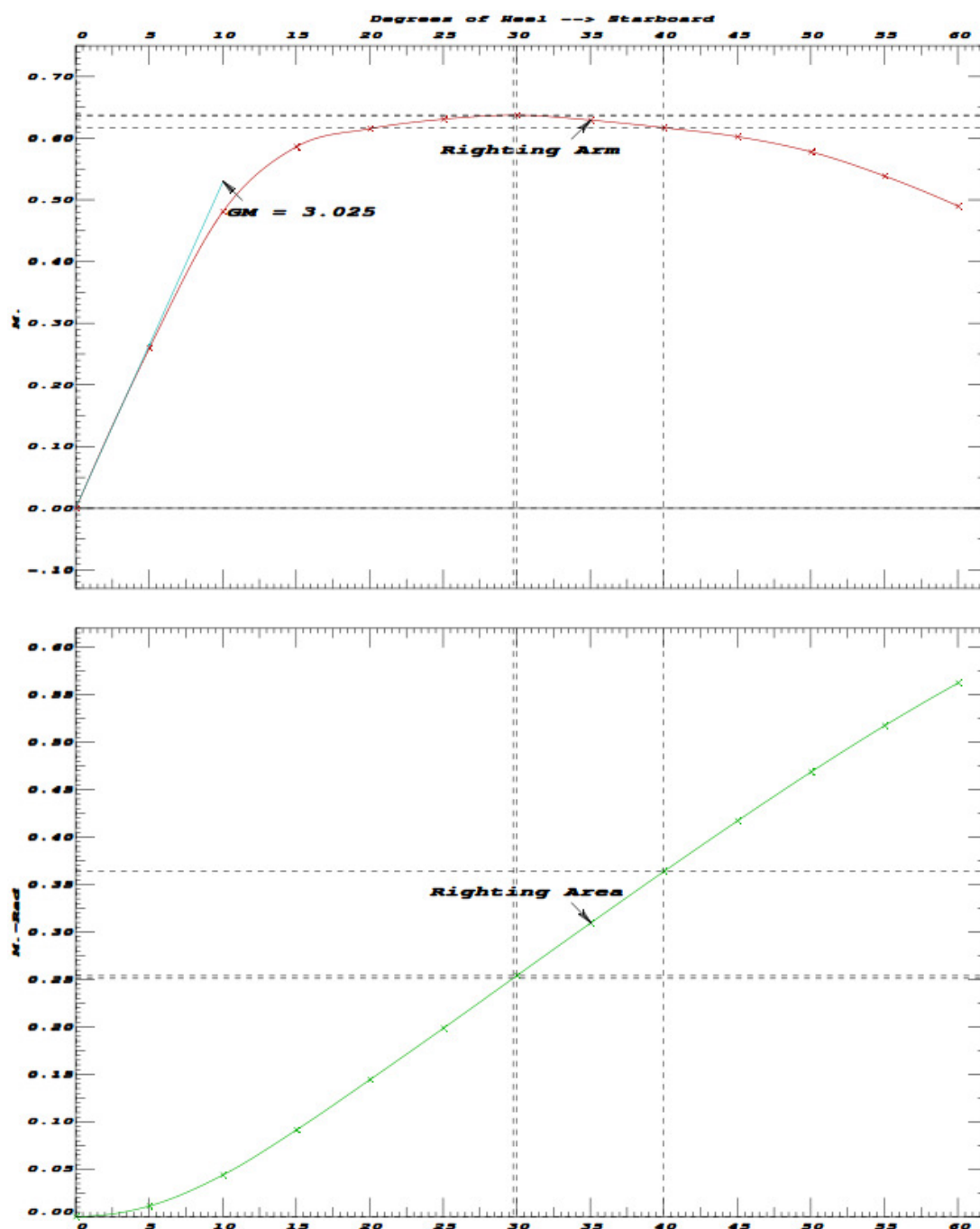
Slika 98. Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 3 na površini.



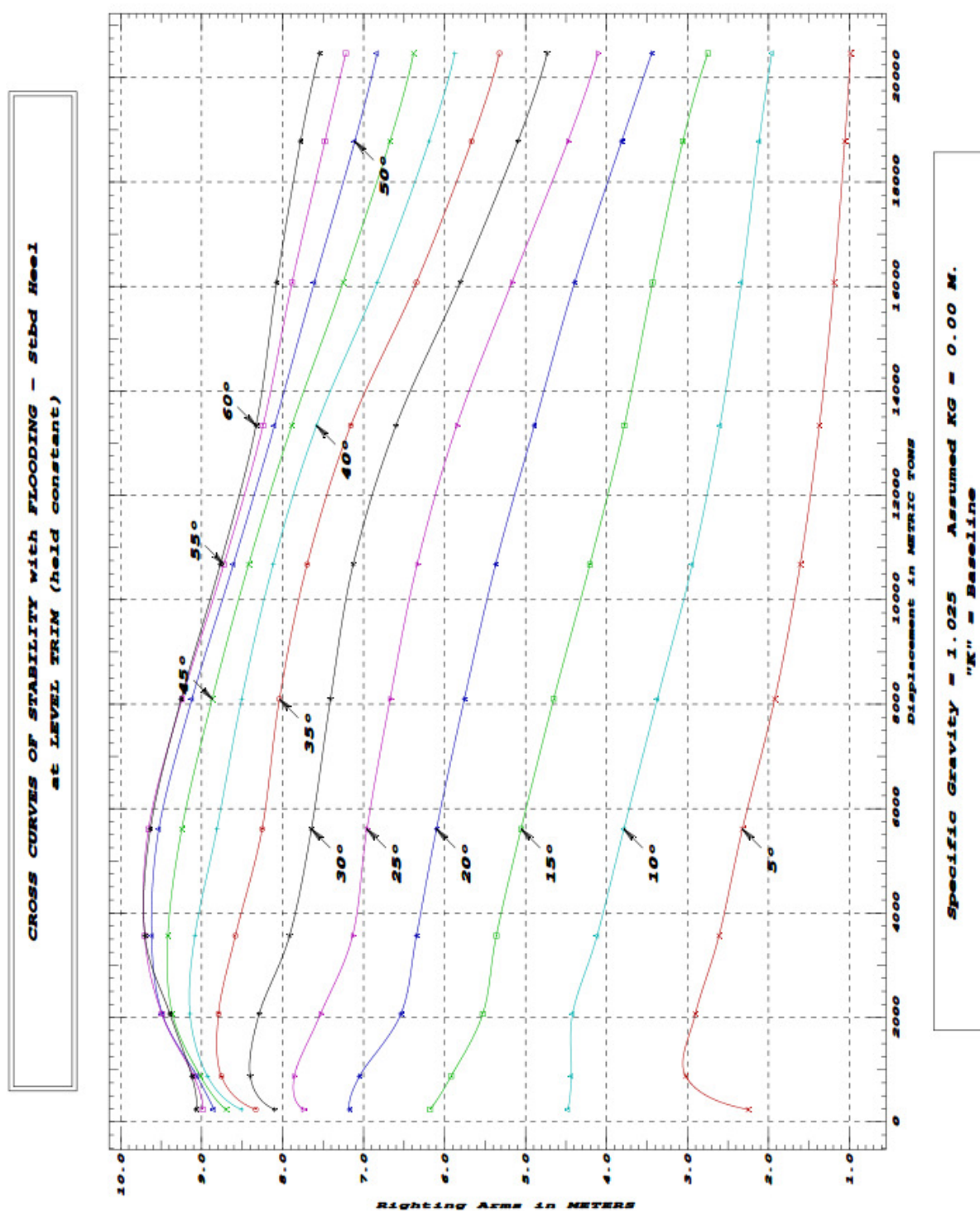
Slika 99. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 4 na površini.

LIM-----	STABILITY CRITERION-----	Min/Max-----	Margin
(1)	Area from 0 deg to 30	> 0.0550 m.-Rad	362%
(2)	Area from 0 deg to 40	> 0.0900 m.-Rad	304%
(3)	Area from 30 deg to 40	> 0.0300 m.-Rad	266%
(4)	Righting Arm at MaxRA	> 0.200 m.	219%
(5)	Absolute Angle at MaxRA	> 25.00 deg	5 deg
(6)	GM Upright	> 0.150 m.	1917%
-----Relative angles measured from 0.031 -----			

Slika 100. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 4 na površini.



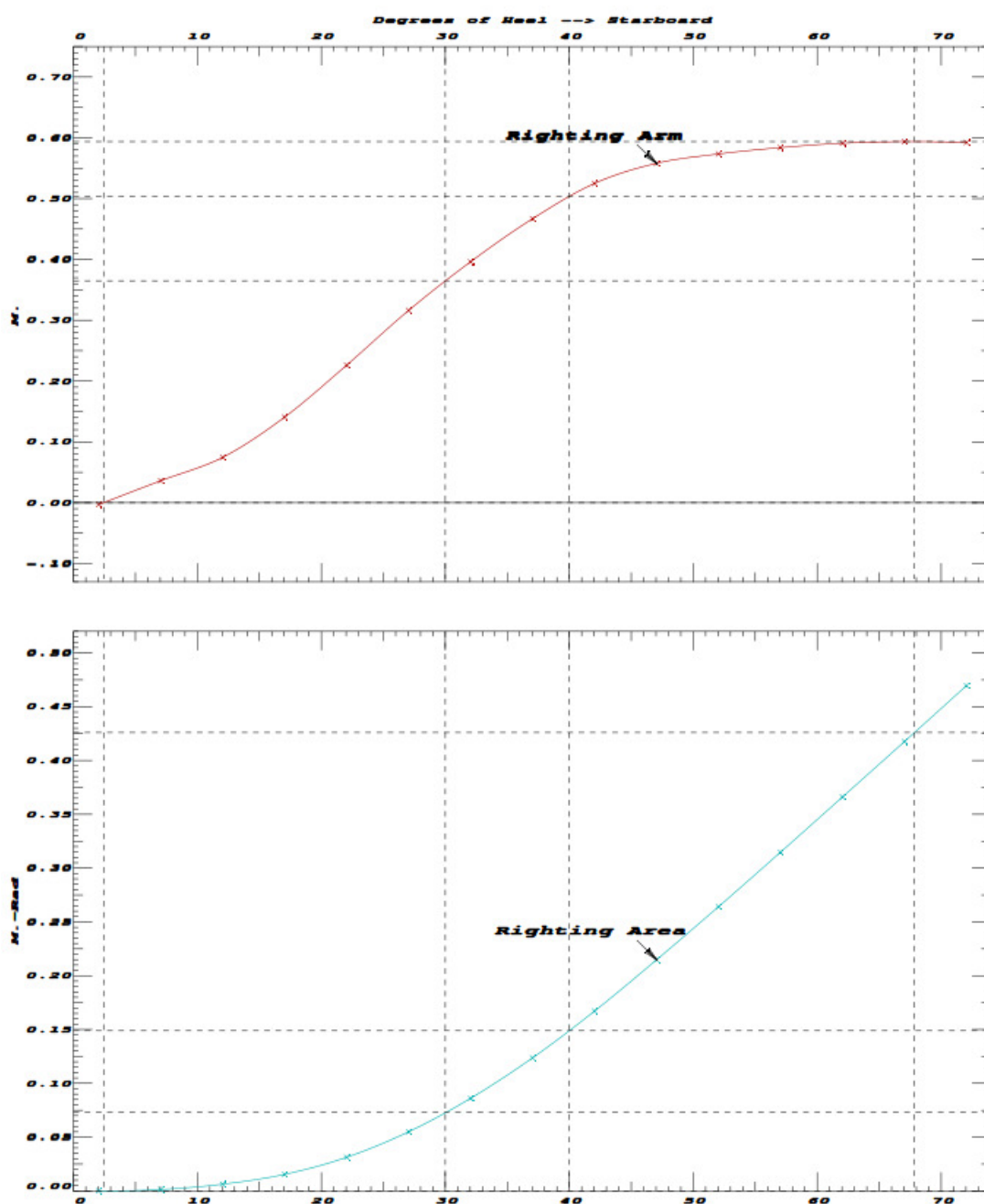
Slika 101. . Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 4 na površini.



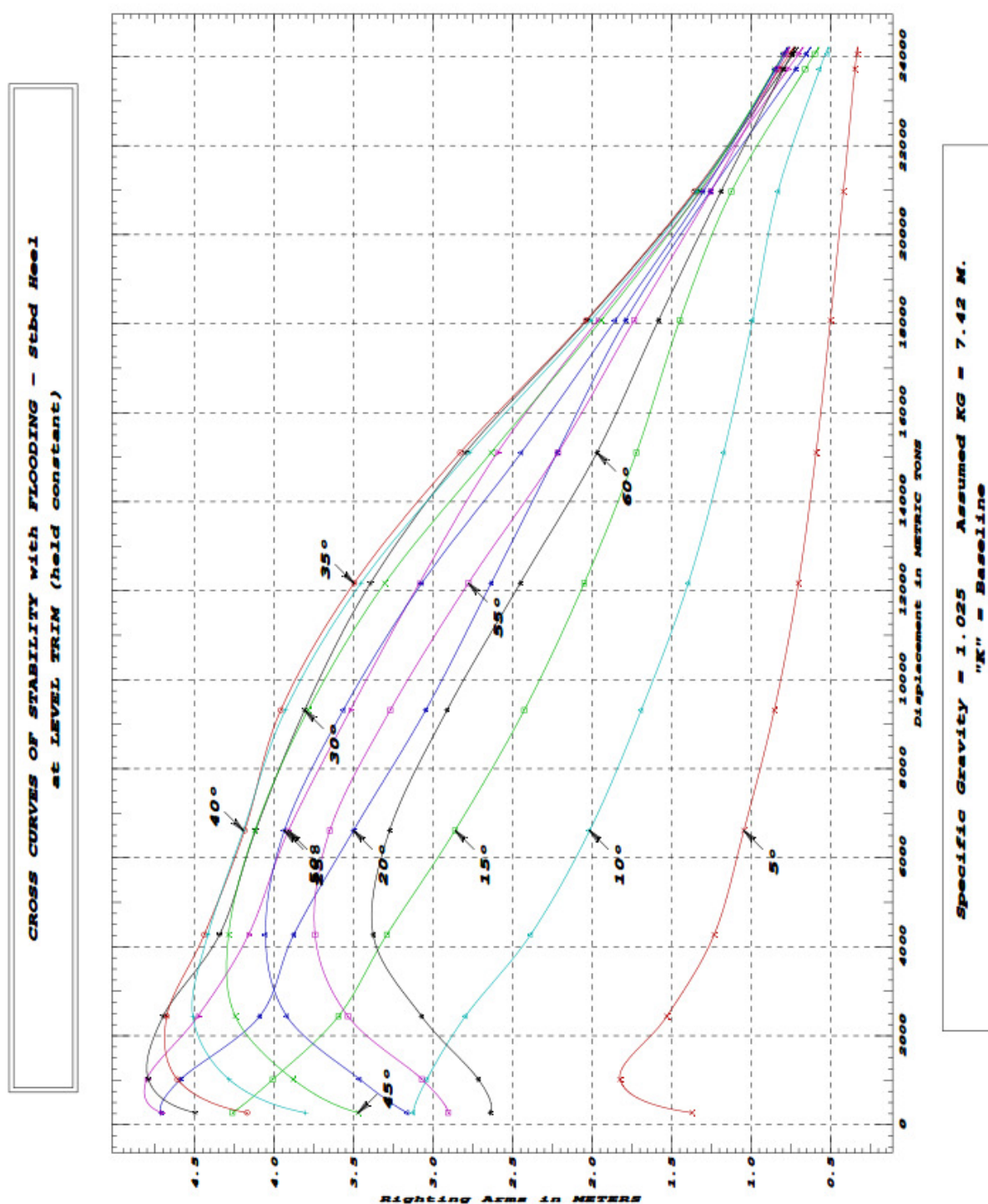
Slika 102. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 5 na površini.

LIM-----	STABILITY CRITERION-----	Min/Max-----	Margin-----
(1) Area from 0 deg to 30		> 0.0550 m.-Rad	57%
(2) Area from 0 deg to 40		> 0.0900 m.-Rad	86%
(3) Area from 30 deg to 40		> 0.0300 m.-Rad	170%
(4) Righting Arm at MaxRA		> 0.200 m.	197%
(5) Absolute Angle at MaxRA		> 25.00 deg	43 deg
(6) GM Upright		> 0.150 m.	202%
-----Relative angles measured from 2.042s-----			

Slika 103. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 5 na površini.



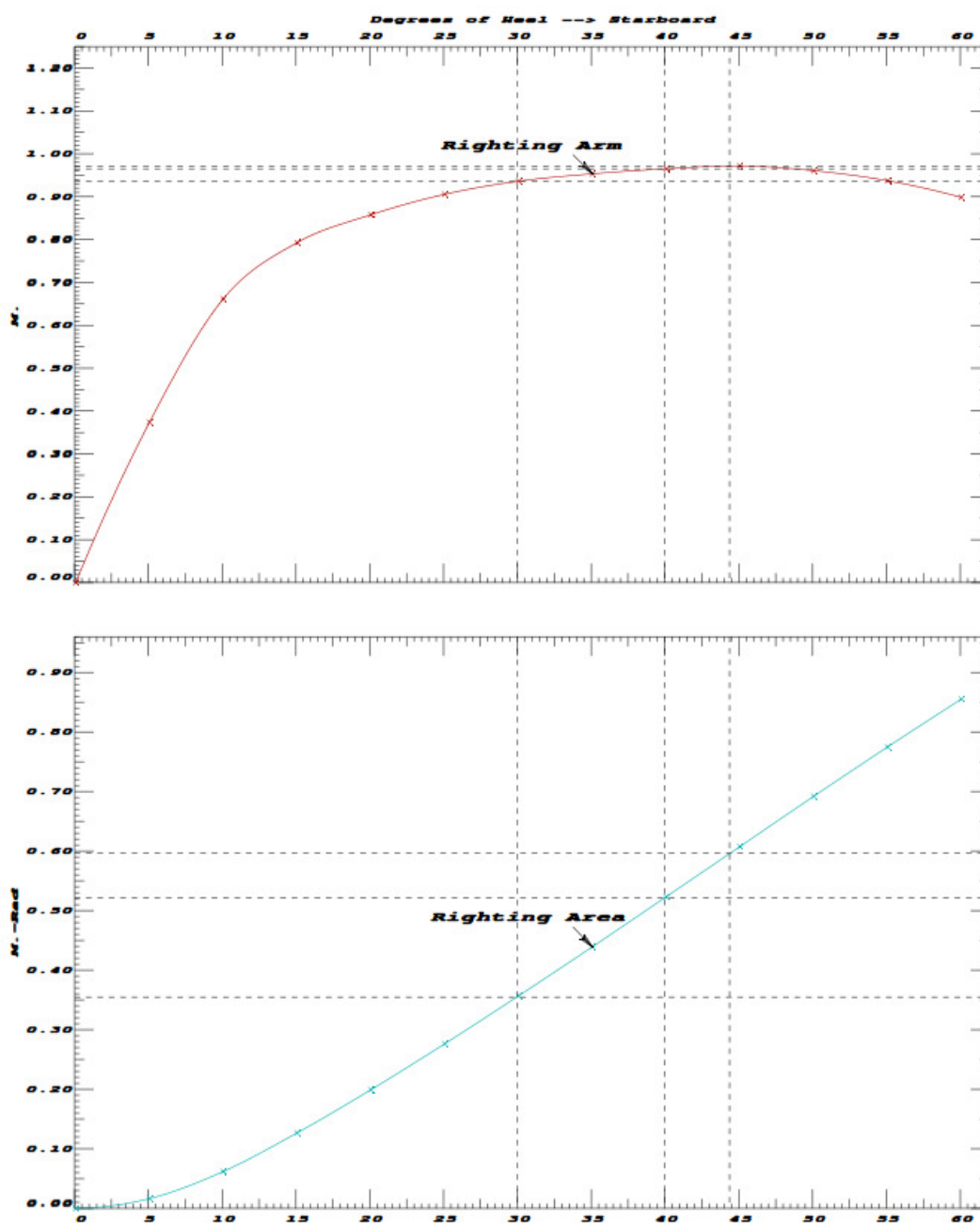
Slika 104. . Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 5 na površini.



Slika 105. KN krivulje za balastiranu Typhoon podmornicu na morskoj površini poslije oštećenja 6 na površini.

LIM	STABILITY CRITERION	Min/Max	Margin
(1)	Area from 0 deg to 30	> 0.0550 m.-Rad	549%
(2)	Area from 0 deg to 40	> 0.0900 m.-Rad	481%
(3)	Area from 30 deg to 40	> 0.0300 m.-Rad	454%
(4)	Righting Arm at MaxRA	> 0.200 m.	386%
(5)	Absolute Angle at MaxRA	> 25.00 deg	20 deg
(6)	GM Upright	> 0.150 m.	2796%
-----Relative angles measured from 0.080 -----			

Slika 106. Usporedba dobivenih rezultata proračuna stabiliteta i zahtijevanih IMO vrijednosti za oštećenje 6 na površini.



Slika 107. Prikaz poluge statičkog stabiliteta i površine ispod nje za oštećenje 6 na površini.